



**В.Л. Ланин
В.А. Емельянов**

**ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫЕ
СОЕДИНЕНИЯ
В ЭЛЕКТРОНИКЕ
ТЕХНОЛОГИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ,
КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА**

В. Л. Ланин, В.А. Емельянов

**ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ
В ЭЛЕКТРОНИКЕ:
ТЕХНОЛОГИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ, КОНТРОЛЬ
КАЧЕСТВА**

**Минск
«Интегралполиграф»
2013**

УДК 621.791.3: 621.396.6

Ланин В. Л. Электромонтажные соединения в электронике: технология, оборудование, контроль качества / В.Л. Ланин, В.А. Емельянов. – Минск: Интегралполиграф, 2013. – 406 с. ISBN 978-985-6845-41-6

В монографии приведены описания процессов, конструкций и материалов соединений, инструментов и оборудования, используемых для формирования электромонтажных соединений в изделиях электроники. Рассмотрены физико-химические основы процессов создания паяных и микросварных соединений, применение интенсифицирующих воздействий, непаяные электромонтажные соединения и методы контроля качества соединений.

Проблемы технологии электромонтажных соединений в электронике приобрели особую актуальность в связи с высокой функциональной сложностью компонентов и интеграцией их в малых объемах микроплат и микроблоков. Переход на бессвинцовые припои при формировании электромонтажных соединений ставит ряд задач по совершенствованию технологии, оптимизации температурных профилей нагрева, контролю качества соединений.

Книга предназначена для инженерно-технических специалистов, аспирантов и студентов технических вузов, специализирующихся в области технологии производства электронной аппаратуры.

Табл.47. Ил.305. Библиограф.: 200 назв.

Р е ц е н з е н т ы:

акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. *В.А. Лабунюв*,
член-кор. НАН Беларуси, д-р физ.-мат. наук, проф. *Ф.Ф. Комаров*

© Ланин В.Л.,
Емельянов В.А., 2013

ISBN 978-985-6845-41-6

Содержание

Введение	8
Глава 1.	
ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЯХ	10
1.1. Тенденции развития электромонтажных соединений	10
1.2. Классификация и характеристика видов соединений	17
1.3. Соединения в сквозные отверстия электронных модулей	21
1.4. Планарный и поверхностный монтаж электронных компонентов	24
1.5. Непосредственный монтаж кристаллов и микрокорпусов	29
1.6. Микросварные соединения в интегральных микросхемах и микросборках	32
1.7. Соединения в многокристальных модулях	36
1.8. Микро- и наноразмерные контактные соединения	41
Список литературы к главе 1	43
Глава 2.	
ОСНОВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	44
2.1. Припой для электромонтажных соединений	44
2.2. Свойства припоев в зависимости от состава и наличия примесей	47
2.3. Бессвинцовые припои	49
2.4. Флюсы для электромонтажной пайки	53
2.5. Припойные пасты	55
2.6. Токопроводящие клеи	59
2.7. Микропроволоки для контактных соединений	61
2.8. Защитные жидкости и покрытия для пайки	65
2.9. Материалы для очистки соединений	68
Список литературы к главе 2	70
Глава 3.	
ПАЯЕМОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ	72
3.1. Паяемость и критерии ее оценки	72
3.2. Методы оценки паяемости погружением в расплав	74
3.3. Методы оценки паяемости по капиллярному проникновению и площади растекания припоя	78
3.4 Паяемость гальванических покрытий	83

	5
3.5 Паяемость электронных компонентов	87
Список литературы к главе 3	93
Глава 4.	
ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМОНТАЖНОЙ ПАЙКИ	95
4.1 Подготовка поверхностей к пайке	95
4.2. Удаление оксидных пленок с паяемых поверхностей	98
4.3. Процессы на межфазной границе раздела припой – паяемая поверхность	103
4.4. Капиллярное проникновение припоя и диффузия	105
4.5. Кристаллизация припоя и формирование структуры соединений	107
Список литературы к главе 4	109
Глава 5.	
ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ И ФИНИШНЫЕ ОПЕРАЦИИ ПРИ ПАЙКЕ	110
5.1. Лужение поверхностей деталей и компонентов	110
5.2. Методы флюсования	114
5.3. Дозирование заготовок припоя при массовой пайке	118
5.4. Формирование матричной структуры выводов припоя	121
5.5. Ограничение площади растекания припоя	127
5.6. Нанесение паяльных паст	129
5.7. Методы очистки от остатков флюса	133
5.8. Контроль качества очистки поверхностей после пайки	140
Список литературы к главе 5	142
Глава 6.	
МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАГРЕВА	143
6.1. Классификация методов нагрева и их сравнительная эффективность	143
6.2. Оборудование и инструмент для нагрева теплопроводностью	148
6.3. Конвективные источники нагрева	152
6.4. Конденсационная пайка	156
6.5. Высокочастотный нагрев для пайки соединений	162
6.5.1. Выбор частоты нагрева	162
6.5.2. Методы и устройства высокочастотного нагрева	165
6.5.3. Оборудование и оснастка для высокочастотного нагрева	167
6.6. Инфракрасный нагрев	178
6.6.1. Особенности инфракрасного нагрева	178
6.6.2. Оборудование инфракрасного нагрева	181
6.6.3. Оптимизация температурных профилей инфракрасного нагрева	186

	6
6.7. Лазерная пайка	193
6.7.1. Твердотельные лазеры для монтажной пайки	193
6.7.2. Лазерные диодные системы для пайки	200
Список литературы к главе 6	203
Глава 7.	
ТЕХНОЛОГИИ МОНТАЖНОЙ ПАЙКИ СОЕДИНЕНИЙ	206
7.1. Пайка с помощью паяльников и паяльных станций	206
7.2. Пайка элементов в отверстия печатных плат	210
7.3. Пайка элементов с планарными выводами	220
7.4. Методы пайки поверхностного монтажа	223
7.4.1. Пайка двойной волной припоя	223
7.4.2. Конвективные методы пайки	224
7.4.3. Селективная пайка выводных компонентов	227
7.5. Демонтаж электронных компонентов	228
Список литературы к главе 7	231
Глава 8.	
СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПАЙКИ	233
8.1. Ультразвуковая пайка и металлизация в электронике	233
8.1.1. Физические модели ультразвуковых эффектов в расплавах	233
8.1.2. Удаление оксидных пленок и интенсификация процесса смачивания	239
8.1.3. Диффузия и химическое взаимодействие расплавов с паяемыми материалами	245
8.1.4. Технологическое оснащение ультразвуковой пайки	254
8.1.5. Влияние параметров ультразвуковых процессов на свойства соединений	265
8.2. Электронно–лучевая и ионно–лучевая пайка соединений	269
8.2.1. Технология электронно–лучевой пайки	269
8.2.2. Процессы ионно-лучевой пайки и лужения	272
Список литературы к главе 8	276
Глава 9.	
МОНТАЖНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ	279
9.1. Монтаж кристаллов и микроплат на токопроводящий клей	279

	7
9.2. Монтаж кристаллов полупроводниковых приборов на эвтектику	285
9.3. Автоматизированный монтаж кристаллов вибрационной пайкой Монтаж кристаллов транзисторов MOSFET и IGBT	290
9.4. Бессвинцовые припойные композиции для монтажа кристаллов	297
9.5. Монтаж жесткими объемными выводами	302
Список литературы к главе 9	309
Глава 10.	
МОНТАЖНАЯ МИКРОСВАРКА	310
10.1. Классификация методов и механизмы образования соединений	310
10.2. Термокомпрессионная микросварка	311
10.3. Ультразвуковая микросварка проволочных выводов	313
10.4. Ультразвуковая микросварка ленточных выводов	319
10.5. Термозвуковая микросварка	323
10.6. Автоматическое оборудование микросварки	327
10.7. Инструмент для микросварки	333
10.8. Микросварка расщепленным электродом	336
10.9. Лазерная микросварка	338
Список литературы к главе 10	342
Глава 11.	
НЕПАЯНЫЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ	344
11.1. Монтаж соединений накруткой	344
11.1.1. Конструкции соединений накруткой	344
11.1.2. Технология и инструмент накрутки	348
11.1.3. Контроль качества соединений накруткой	349
11.2. Зажимное соединение сжатием	351
11.3. Соединение обжатием	351
11.4. Эластичное соединение	352
11.5. Соединение врезанием	353
11.6. Соединения типа Press-Fit	354
Список литературы к главе 11	359

Глава 12.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ	360
12.1. Методы контроля качества соединений	360
12.2. Контроль электрических параметров паяных соединений	365
12.3. Контроль физико-механических свойств соединений	366
12.4. Металлографический контроль качества соединений	370
12.5. Типичные дефекты паяных соединений	372
12.5.1. "Холодная" пайка	372
12.5.2. Растворение покрытий	374
12.5.3. Интерметаллидные соединения	376
12.5.4. Отсутствие смачивания	377
12.5.5. Эффект "надгробного камня"	380
12.5.6. Сдвиг компонента	383
12.5.7. Отток припоя	384
12.5.8. Образование перемычек	386
12.5.9. Отсутствие электрического контакта	387
12.5.10. Образование шариков припоя	389
12.5.11. Образование пустот	391
12.6. Методы контроля скрытых дефектов соединений	392
12.7. Надежность паяных соединений	399
Список литературы к главе 12	405

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы формирования электромонтажных соединений в технологии изделий электроники (ИЭ) имеют особую актуальность по целому ряду причин. Операции сборки и монтажа являются до сих пор самыми трудоемкими при изготовлении ИЭ и занимают до 50–70 % общей трудоемкости изготовления изделий. Микроминиатюризация элементов и создание функционально сложных микрорелектронных устройств, в частности сверхбольших интегральных микросхем (СБИС) и микропроцессоров вызвала особые проблемы в области микро-монтажа ИЭ. Увеличение плотности активных элементов на кристалле в среднем на 75 % в год вызывает необходимость в увеличении количества выводов на корпусах на 40 % в год [1]. Это обуславливает постоянно растущий спрос на новые методы корпусирования, создающие высокую плотность межсоединений на печатных платах. Высокую функциональную сложность и степень интеграции невозможно реализовать без принципиального совершенствования системы контактных соединений. Разработка микропроцессоров с рабочей частотой сигнала до 3,5 ГГц увеличивает число выводов до 1000 [2].

Освоение электронных сборок V поколения - многокристальных модулей (МКМ) - тонкопленочных многослойных гибридных конструкций, выполненных на керамических, кремниевых или металлических подложках, к которым бескорпусные кристаллы присоединяются методами сварки или пайки, повысило плотность монтажных соединений до 200 на см² [3]. Традиционные процессы монтажа не обеспечивают необходимой в настоящее время высокой производительности и высокого процента выхода годных изделий с плотным монтажом. Статистические данные показывают, что 50-80 % всех отказов в ИЭ происходит вследствие дефектов соединений, причем стоимость обнаружения и исправления отказа на этапе сборки блока обходится в 100 раз дешевле, чем при испытаниях аппаратуры [4].

Переход на бессвинцовые припои при монтаже ИЭ ставит ряд задач по обеспечению хорошей смачиваемости поверхностей, оптимизации температурных профилей нагрева, контролю качества соединений. С повышением функциональной сложности ИЭ растут проблемы их демонтажа с поверхности плат, в особенности многовыводных корпусов BGA, контактируемых с помощью шариковых выводов.

Повышение производительности труда, качества и надежности соединений может быть достигнуто за счет широкого внедрения автоматизированного оборудования с микропроцессорным управлением, использования концентрированных потоков энергии электромагнитного поля, включая высокочастотное, инфракрасное, лазерное излучение, разработки новых материалов для формирования соединений.

Одной из проблем использования бесконтактных методов активации явля-

ется недостаточная изученность механизмов воздействия концентрированных потоков энергии ультразвукового (УЗ) и электромагнитного (ЭМ) полей на расплавы и электронные компоненты, а также отсутствие моделей процессов диффузии при их совместном действии. Таким образом, для дальнейшего совершенствования технологии формирования контактных соединений необходимо решение комплекса взаимосвязанных проблем, связанных с разработкой теоретических основ методов активации при совместном воздействии энергии УЗ колебаний и ЭМ полей и оборудования, обеспечивающих существенное повышение качества ИЭ и экономию материалов и энергоресурсов.

Особенностями процессов формирования контактных соединений в ИЭ являются: широкая номенклатура используемых электронных компонентов, интегральных микросхем, микросборок; различные виды макросоединений дискретных электронных компонентов на печатных, двусторонних и многослойных платах; микросоединений на подложках, микроплатах, в многокристальных модулях; разнообразные по физической природе источники теплового излучения: потоки расплавленного припоя, нагретый инструмент, концентрированные потоки энергии различных полей. Для реализации высокоэффективных технологических процессов формирования соединений и управления ими в реальном масштабе времени необходимо современное программно-управляемое оборудование, сочетающее возможность компьютерного управления процессами с гибкой переналадкой производства. Обеспечение высокого качества ИЭ в условиях автоматизированного производства невозможно без разработки достоверных математических моделей, описывающих процессы формирования соединений с применением активирующих факторов.

Таким образом, для получения качественных и стабильных контактных соединений необходимо решение комплекса взаимосвязанных проблем, направленных на разработку моделей и технологических основ новых активированных процессов формирования соединений, теоретическое и экспериментальное исследование механизмов формирования соединений, создание оборудования на основе совместного применения концентрированных потоков энергии различных полей, что обеспечит существенное повышение качества изготавливаемых изделий, экономию материалов и снижение энергопотребления.

Решению названных актуальных для науки и практики задач и посвящена настоящая книга.

ГЛАВА 1

ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЯХ

1.1. Тенденции развития электромонтажных соединений

Современная мировая промышленность производит больше чем 60 миллиардов различных электронных устройств в год. Это разнообразие включает устройства, которые управляют системами персональных компьютеров, космических кораблей, самолетов, автомобилей, телевизоров, мобильными телефонами, цифровыми камерами, DVD проигрывателями и др. Рынок требует больше функций в меньших по размерам, быстрых, более дешевых устройствах, которые собираются в множестве корпусов типов CSP, BGA, WCSP, TCSP, PLCC, SOIC, SOP и др. Таким образом, технология межсоединений – это та критическая технология, которая соединяет микромир полупроводниковых чипов с внешним миром электронных устройств.

Увеличение производительности компьютерной техники и средств цифровой связи наряду с увеличением быстродействия элементной базы находится в непосредственной зависимости от сокращения длины связей между логическими элементами, так называемой конструктивной задержки передаваемого сигнала. Если сопоставить значение времени переключения логических элементов, не превышающее в современных БИС единиц наносекунд, со временем распространения сигнала в печатных проводниках (6–7 нс/м), то, очевидно, что главной составляющей временных задержек в изделиях электроники являются задержки в межсоединениях. Повышение быстродействия должно сопровождаться максимально возможным снижением этих задержек, что достигается повышением степени интеграции логических элементов, более плотной компоновкой микросхем на платах и сокращением длины связей.

Увеличение степени интеграции вызывает рост числа входных (выходных) выводов микросхем n , подчиняющийся соотношению Рента [3]:

$$n = kN^p, \quad (1.1)$$

где k — среднее число межсоединений, приходящееся на один логический элемент; N — количество логических элементов, p — показатель Рента, зависящий от структуры логических схем.

Например, в ИС, для двухвходового вентиля $k = 3...4$, для микропроцессорной логики $p < 0,5$, для логики высокопроизводительных процессоров $p = 0,5...0,75$. Число соединений N_c определяется суммарным числом выводов всех M микросхем, подключаемых к проводникам печатной платы:

$$N_c = k_p Mn, \quad (1.2)$$

где k_p — коэффициент разветвления соединений, зависящий от числа нагрузок m в цепях межэлементных связей: $k_p = m/(m+1)$, так что $0,5 < k_p < 1,0$.

Отношения к площади платы S_n суммарного числа цепей N_u и произведения количества выводов компонентов N_e и коэффициента использования поверхности платы K_u , представляют соответственно плотности проводников и монтажа:

$$P_{np} = \frac{N_u}{S_n}, \quad (1.3)$$

$$P_m = \frac{\sum N_e \cdot K_u}{S_n} \quad (1.4)$$

K_u можно вычислить как:

$$K_u = \frac{\sum S_{кэ}}{S_n}. \quad (1.5)$$

$S_{кэ}$ — площадь монтажных отверстий для выводных компонентов и контактных площадок для поверхностно монтируемых компонентов.

Существуют и другие эмпирические уравнения для оценки плотности монтажных соединений [2]:

$$P_c = 2,25 p N_e, \quad (1.6)$$

где p — шаг между корпусами электронных компонентов.

Плотность проводников увеличивается при уменьшении площади печатной платы и увеличении количества цепей межсоединений. Для повышения плотности монтажа необходимо не только увеличивать плотность трассировки проводников, а гораздо эффективнее увеличивать количество межслойных соединений.

Технологические изменения в области сборки печатных плат связаны с новыми конструкциями пассивных компонентов и ИС. В результате перехода на поверхностный монтаж, в ближайшем будущем корпуса типа PLCC и ТО, которые составляют около 90% всех продаж приборов, заменяются на P-DSO и SOT-23. Корпуса типа PLCC заменяются на P-DSO при большом числе выводов и на PQFP при их малом количестве. Основной причиной такой замены являются проблемы контроля паяных соединений выводов j-типа, расположенных под корпусами, а также большая площадь поверхности печатной платы, занимаемой корпусами P-LCC [4].

Керамические и пластмассовые корпуса QFP широко используются для матриц логических элементов и микропроцессоров. Прогрессирующая миниатюризация аппаратуры ведет к дальнейшему снижению размеров корпусов, которые становятся все меньше и тоньше. Сверхтонкие корпуса типа P-

TSOP или P-TQFP со стандартным числом выводов, становятся реальной альтернативой большинству методов монтажа кристаллов с высокой плотностью, таким как TAB (Tape Automated Bonder), COB (Chip on Board) и метода перевернутого кристалла (Flip Chip).

Применение SMD корпусов у изготовителей аппаратуры связано с определенными трудностями, что является результатом снижения расстояния между выводами и увеличением их числа. Основной проблемой, сдерживающей широкое применение корпусов с шагом менее 0,3 мм, является миниатюрность выводов и необходимость облегчения их высокой копланарности. Отклонение от нормального положения хотя бы одного вывода приводит к отказу аппаратуры.

Одним из перспективных направлений в монтаже кристаллов являются технологии TCP (Tape Carrier Package), при которой внутренние соединения выполняются в качестве TAB. При использовании в качестве носителя кристалла фольгированной пленки и расстоянии между выводами до 0,3 мм, возможно получить результаты, аналогичные технологиям штамповки, травления FeNi42 и применения медной рамки. Что касается места, занимаемого на плате, корпуса TCP сопоставимы по размерам с COB и Flip Chip (рис. 1.1).

По сравнению с монтажом в отверстия, технология монтажа на поверхность создает в компонентах в процессе пайки более высокие термомеханические напряжения. При пайке оплавлением пластмассовых корпусов больших размеров, в результате испарения влаги возникает эффект «воздушной кукурузы», что может привести к появлению трещин как в корпусе, так и в кристалле.

Корпус BGA (Ball Grid Arrays) привлекает к себе пристальное внимание, поскольку обладает большими преимуществами. Изделия с BGA могут быть собраны на существующих SMD сборочных линиях, причем расстояние между выводами не представляет серьезной проблемы. В отличие от Ultra-Fine Pitch, паяные соединения в BGA расположены достаточно свободно, типичное расстояние 1,27 или 1,52 мм. Корпуса BGA имеют меньший размер контактных площадок по сравнению с QFP и занимают на 50% меньшую площадь на плате по сравнению с ними. В отличие от TAB, шариковые выводы в BGA до сборки полностью контролепригодны и не требуют специальной аппаратуры.

Кроме того, BGA могут применяться для монтажа кристаллов с большим количеством выводов – 86, 119, 169, 225 и 357. Корпуса BGA могут быть сконструированы с меньшей длиной соединений, т. е. с меньшей индуктивностью выводов, имеют более высокую механическую резонансную частоту и рассеивает большую мощность по сравнению с QFP при прочих равных условиях.

Общими тенденциями, определяющими процессы сборки электронных модулей в ближайшие годы, являются:

- переход к более миниатюрным, сверхбыстрым электронным модулям с возрастающей степенью функциональности;
- короткий срок жизни изделия, за который полная оптимизация спектра компонентов и печатной платы практически невозможна;

- возрастание степени интеграции компонентов (количества каналов ввода/вывода) и повышение рабочих частот;
- увеличение количества выводов корпусов и уменьшение минимального шага выводов (до 0,15 мм);
- интеграция нескольких приборов в одном кристалле или корпусе;
- передача сборочно-монтажного производства от фирм-разработчиков к специализированным фирмам;
- улучшение коэффициента использования и увеличение производительности сборочных систем, качественных и количественных показателей сборки за счет современного программного обеспечения;
- сокращение удельной стоимости монтажа компонентов;
- разработка альтернативных концепций и оборудования сборочно-монтажного производства в целях поиска преимуществ в конкуренции;
- выделение быстро развивающихся областей производств в электронной индустрии: персональных компьютеров и периферийных устройств (принтеров, модемов и сетевых адаптеров); средств связи (мобильных телефонов и смартфонов, электронных модулей для АТС и базовых станций сотовой связи); автомобильной электроники (бортовых компьютеров и сенсорных устройств).

Уменьшение шага выводов для корпусов PBGA и QFP фактически достигло своих пределов: 0,63 и 0,3 мм, а для FBGA достигнет значения 0,15 мм. Новым подходом в повышении плотности упаковки корпусов является 3D-интеграция, потенциальные преимущества которой заключаются в уменьшении размеров изделий электроники, сокращении длины межсоединений за счет замены длинных горизонтальных связей на короткие вертикальные, снижении энергопотребления. Существуют различные виды 3D-интегрированных структур (рис. 1.2):

- SiP – система в корпусе представляет многокристальные модули, расположенные друг над другом и с организацией межсоединений проволоочными выводами;
- SoP – система на корпусе представляет многоэтажные корпуса с организацией межсоединений с помощью шариковых выводов (бампов);
- TSV- Through Silicon Vias – многокристальные модули с межсоединениями в виде переходных отверстий в материале кристалла.

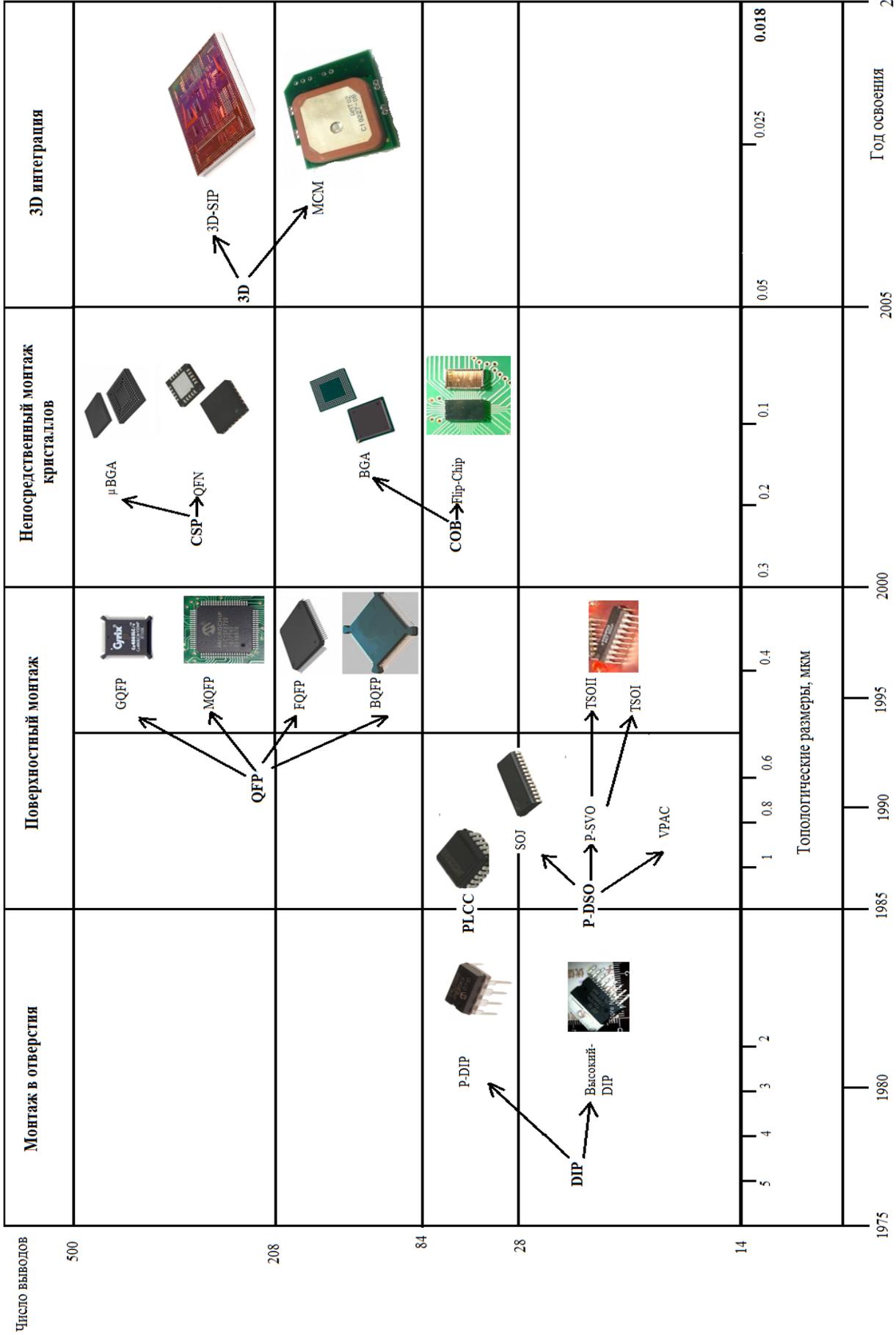


Рис. 1.1. Эволюция корпусов ИМС и технологий монтажа

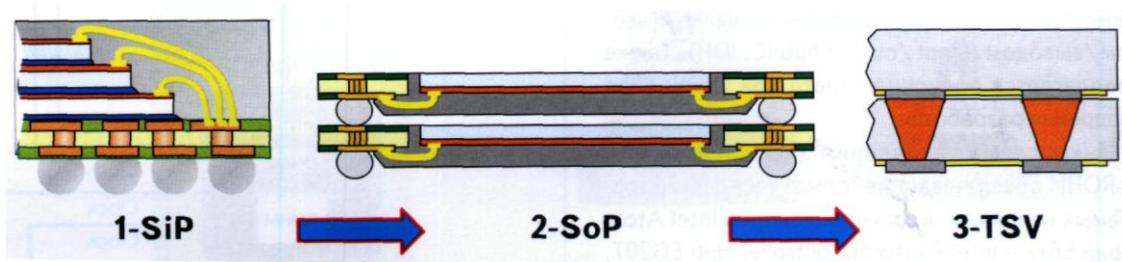


Рис. 1.2. 3D – интегрированные структуры

Система в корпусе может иметь в своем составе пассивные компоненты, микроэлектромеханические системы (МЭМС), оптические компоненты и др. Объединение этих компонентов в одном корпусе существенно снижает массогабаритные характеристики изделия и его стоимость. Однако наличие большого числа проволочных перемычек на различных уровнях (рис. 1.3) усложняет монтаж и не способствует повышению надежности изделия [5].

Система на корпусе представляет многоярусный корпус, состоящий из нескольких кристаллов, межсоединения между которыми организованы с помощью шариковых выводов (бампов), что повышает плотность соединений и увеличивает надежность изделий. Такая конструкция системы отличается сложностью внесения в нее изменений, а также ограниченным выходом годных изделий.

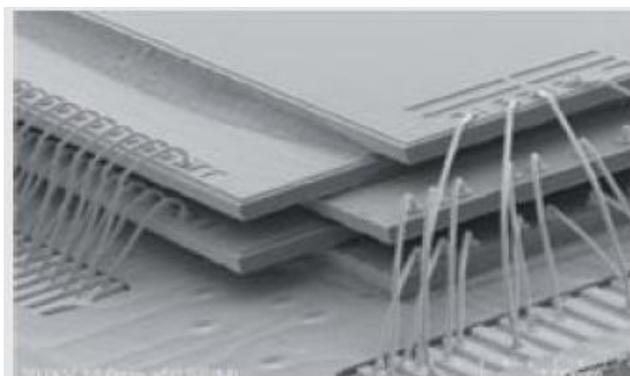


Рис. 1.3. Проволочный микромонтаж в 3D –структуре

Для трехмерной интеграции проводят утончение стандартных кремниевых пластин толщиной 500 мкм до толщины до 50 мкм, а контактирование осуществляют созданием сквозных отверстий в микрочипе (TVS), что повышает плотность соединений.

Высокая степень интеграции может быть достигнута за счет технологии монтажа на кремниевой пластине (Wafer Level Packaging –WLP). До разделения пластины на чипы на ней выполняются такие технологические операции, как монтаж и контактирование пассивных и активных компонентов, формирование внешних выводов и корпусирование.

Новые технологии межсоединений позволяет реализовать встраивание активных и пассивных компонентов в печатные платы (рис. 1.4), что обеспечивает улучшенные электрические и тепловые характеристики изделий. Слои со встроенными компонентами могут использоваться как внутренние слои многослойной печатной платы, на наружные стороны которой могут монтироваться как компоненты поверхностного монтажа, так и кристаллы БИС.

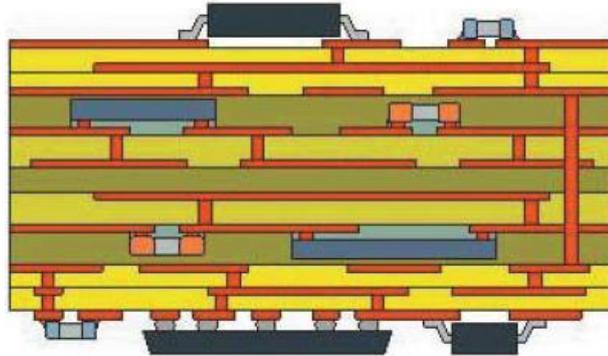


Рис. 1.4. Многослойная печатная плата со встроенными компонентами

При монтаже кристаллов на подложку корпуса и корпуса на плату или при непосредственном монтаже кристалла на плату неизбежно увеличиваются используемые для этого площади. Это вызвано необходимостью выделения определенного физического пространства для размещения выводов. Этот эффект называют уровнем дезинтеграции, которая оценивается отношением плотности микроэлементов на кристалле к плотности размещения выводов на монтажной площади платы, или площади кристалла S_k к площади монтажного поля платы:

$$Q = S_k / S_n. \quad (1.6)$$

Например, если кристалл процессора имеет размер 10x10 мм, а монтажное поле его корпуса на плате занимает площадь 4000 мм, такое конструктивное исполнение системы межсоединений характеризуется дезинтеграцией с числом 40. Степень дезинтеграции растет по мере возрастания иерархического уровня конструкции: кристалл—микросхема—модуль—блок. В табл. 1.1. приведены данные приближенной оценки дезинтеграции при различных вариантах монтажа кристаллов микросхем на плату [2].

Степени интеграции и дезинтеграции должны соответствовать техническому уровню развития производства. При стремлении выполнить конструкцию на предельных возможностях производства стоимость изделия будет неоправданно высокой из-за большого количества брака, а надежность таких конструкций не будет гарантирована. Изменения в архитектуре микропроцессора могут перевести потребность в дорогом и нормально необоснованном экзотическом корпусе и технологиях межсоединений. Архитектурное влияние на микропроцессор является главным элементом в быстром повышении его работоспособности.

Таблица 1.2. Оценка дезинтеграции вариантов монтажа кристаллов

Вариант монтажа	Площадь монтажного поля на плате, мм ²	Уровень дезинтеграции
Кристалл	100	1
Flip Chip	12,5x12,5	1,5
Wire-Bond	14x14	2
Flip-TAB	24x24	6
BGA	40x38	15
TAB	42x42	18
DIP	2000	20
COB	5000	50
Flat-Pack	72x72	52
PLCC	7500	75
QFP	105x105	110

1.2. Классификация и характеристика видов соединений

При монтаже электронной аппаратуры применяют следующие методы формирования межсоединений: непосредственного контактирования материалов под воздействием давления, тепла, и физического воздействия в различных сочетаниях, с использованием промежуточного материала виде припоя, микропровода, токопроводящего клея (рис. 1.5).

Паяные соединения нашли самое широкое применение при монтаже изделий электроники вследствие следующих достоинств: низкого и стабильного электрического сопротивления, широкой номенклатуры соединяемых металлов, легкости автоматизации, контроля и ремонта. Паяные соединения характеризуются высокой производительностью процесса монтажа, легкостью и достоверностью контроля качества. Процессы пайки легкоплавкими припоями широко используются при монтаже печатных плат и проводных плат, герметизации корпусов полупроводниковых приборов и гибридных ИС, сборки керамических конденсаторов, поверхностно монтируемых элементов. Недостатки паяных соединений связаны с высокой стоимостью используемых цветных металлов, необходимостью удаления остатков флюса, низкой термостойкостью, снижением прочности в результате термического старения.

Низкое электрическое переходное сопротивление и высокая механическая прочность соединений достигаются при объединении контактируемых металлов за счет металлической связи, при этом необходимо атомы металлов сблизить до межатомных расстояний, т.е. до размеров 10 нм и ввести энергию в зону контакта. Серьезным препятствием для контактирования являются жировые пленки и химические окислы на поверхности контактируемых металлов.

Удаление этих пленок химическими методами (флюсованием, обезжириванием) или физическими (ультразвуком, плазменной очисткой) является неотъемлемой частью процесса образования токопроводящих контактных соединений.

Контактные монтажные соединения в электронной аппаратуре должны обладать: минимальным электрическим переходным сопротивлением, высокой механической прочностью, стабильностью электрических и механических параметров во времени, высокой надежностью и долговечностью в заданных условиях эксплуатации. Наиболее важным показателем токопроводящих контактных соединений является переходное электрическое (контактное) сопротивление. Если сравнить падение напряжения в 3-х случаях: в сплошном проводнике на участке АВ, в зоне контакта двух соединенных непосредственно друг с другом материалов и в зоне контакта через промежуточный материал (рис. 1.6), то окажется, что оно будет различным.

Для проводника электрическое сопротивление постоянному току R_v определяется по известному закону Ома; для двух соединенных металлических проводников одинакового сечения и материала электрическое сопротивление контакта R_k равно:

$$R_k = R_v + R_{пер}, \quad (1.7)$$

где $R_{пер}$ — переходное электрическое сопротивление.

В этом случае гомогенную связь между материалами нарушают различные поверхностные неровности и оксидные пленки в месте контакта, и переходное сопротивление складывается из сопротивления оксидных пленок R_n и сопротивления сужения R_c [7]:

$$R_{пер} = R_n + R_c. \quad (1.8)$$

Сопротивление сужения возникает вследствие неровности поверхности контакта, возникновения дефектов в зоне контакта и стягивание линий тока:

$$R_c = \rho L/S_k, \quad (1.9)$$

где ρ - удельное сопротивление, L —длина участка сужения, S_k - площадь поверхности контактирования.

Сопротивление оксидных пленок можно определить как:

$$R_n = \rho_n h/S_k, \quad (1.10)$$

где ρ_n - удельное сопротивление поверхностных пленок, h - толщина пленок.

Для соединения через промежуточный материал контактное сопротивление складывается из следующих составляющих:

$$R_k = R_v + 2R_{nep} + R_m, \quad (1.11)$$

где R_m - электрическое сопротивление слоя промежуточного материала.

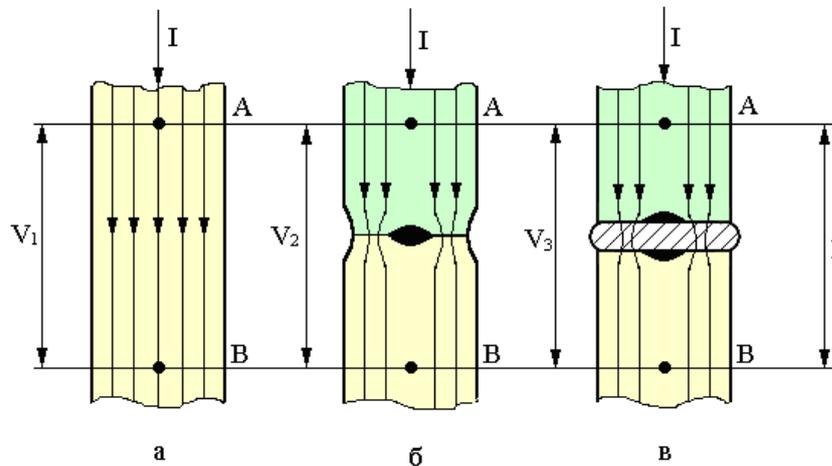


Рис. 1.6. Схемы контактирования: а – сплошной проводник, б – непосредственный контакт, в – соединение через промежуточный материал

Поскольку отношение удельных электрических сопротивлений оловянно-свинцовых припоев и медного проводника составляет:

$$\beta = \rho_{np}/\rho_m = 8-10, \quad (1.12)$$

то контактное сопротивление паяного соединения выше, чем соединения непосредственным контактированием. С учетом этого расчет паяного соединения на токовую нагрузку проводится в наиболее тяжелом варианте, т.е. считается, что весь ток протекает через припой.

Сварные электрические соединения по сравнению с паяными имеют следующие преимущества: более высокую механическую прочность, отсутствие присадочного материала, меньшую площадь контакта. К недостаткам следует отнести: критичность при выборе сочетаний материалов, увеличение переходного сопротивления из-за образования интерметаллидов, сложность группового контактирования и ремонта.

Наибольшее применение при электрическом проволочном монтаже получили ультразвуковая и термокомпрессионная микросварки, а также сварка расщепленным электродом. Структура сварных соединений зависит от технологических факторов: температуры, давления, а также от качества подготовки поверхности. Автоматические сварочные установки обеспечивают высокую производительность контактирования (от 12500 и более соединений в час).

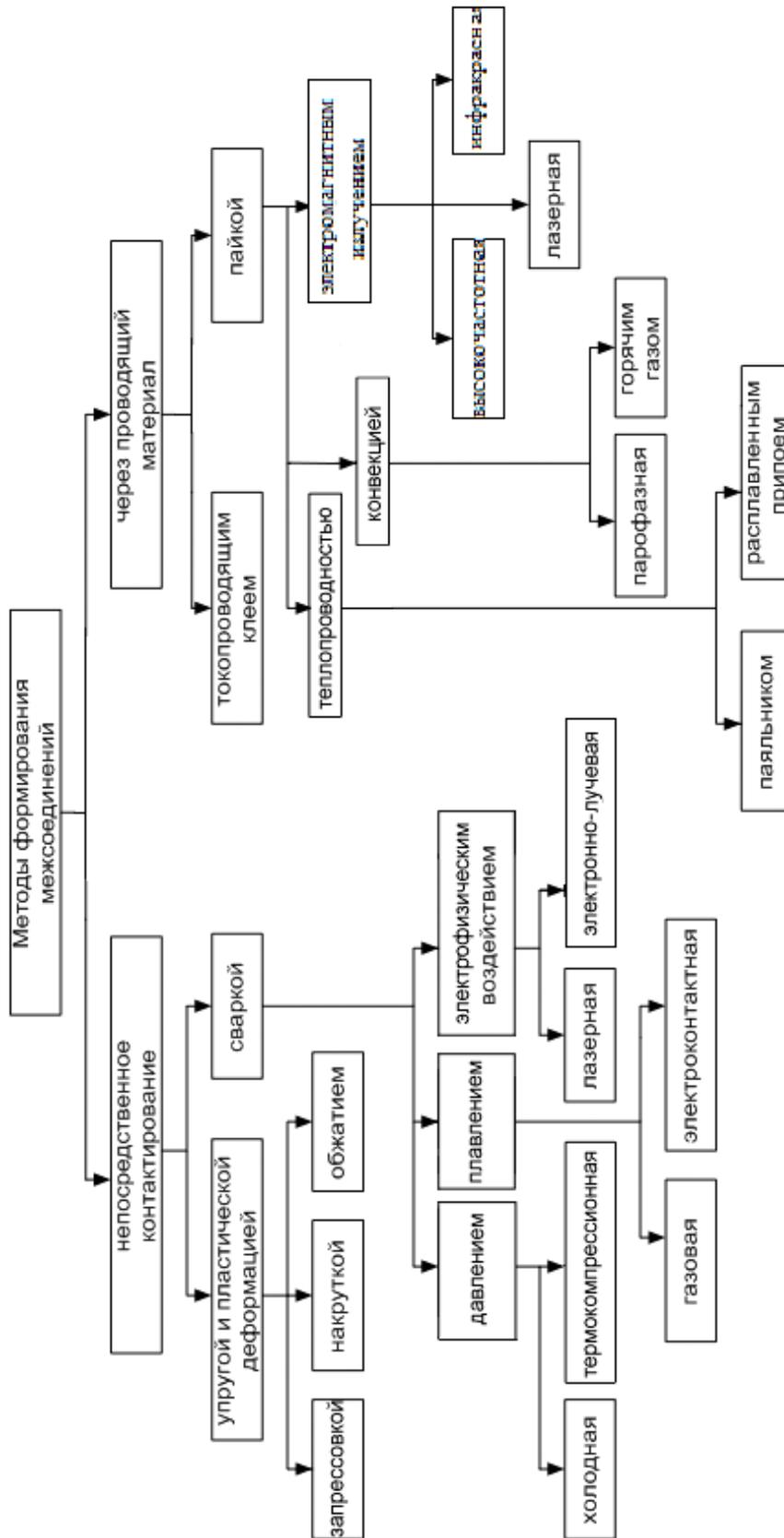


Рис. 1.5. Классификация методов формирования межсоединений

Контактные соединения, основанные на пластической деформации соединяемых элементов в холодном состоянии - накруткой и обжимкой, характеризуются высокой механической прочностью, низким переходным электрическим сопротивлением, легкостью механизации, экономичностью и надежностью при эксплуатации. Недостатками являются: необходимость специальных контактирующих элементов, увеличенная площадь контакта.

Запрессовка или «Press- Fit» представляет соединение, выполняемое впрессовыванием пуклевки контактного штыря в металлизированное отверстие, имеет следующие достоинства: высокая механическая прочность на растяжение, высокая устойчивость к вибрационным нагрузкам и надежность, отсутствие необходимости нагрева, коррозионная стойкость за счет герметичности контакта, экономичность и ремонтпригодность.

Контактирование токопроводящими клеями в отличие от пайки и сварки происходит при более низких температурах и не вызывает изменения структуры соединяемых материалов, однако характеризуется высоким электрическим сопротивлением контакта, низкой термостойкостью и невысокой надежностью соединений. Параметры электромонтажных соединений приведены в табл. 1.2 [6].

Таблица 1.2. Параметры электромонтажных соединений

Вид соединения	Переходное сопротивление, мОм	Прочность, МПа	Интенсивность отказов, 10^{-9} 1/час	Тепловое сопротивление, град/Вт
Сварка	0, 01–1	100–500	0, 1–0, 2	0, 001
Накрутка	1–2	40–60 Н	0, 2–0, 5	0, 0005
Обжатие	1–10	20–50 Н	2–5	0, 001
Запрессовка		10–20 Н		
Пайка	2–5	10–50	1-10	0, 002
Клеевое	$(1–10) \cdot 10^3$	5–10	25–50	0,5–5,0

Анализ данных табл. 1.2, показывает, что для сварных соединений характерен значительный разброс по величине переходного сопротивления в зависимости от метода получения. Соединения накруткой стабильны по электрическим и механическим свойствам. Механическая прочность и надежность паяных соединений зависят от технологических параметров процесса и конструкции соединений.

1.3. Соединения в сквозные отверстия электронных модулей

В изделиях электроники второго и третьего поколений радиоэлементы с осевыми выводами: резисторы типа МЛТ, конденсаторы типа КМ и др., а также ИС в прямоугольных корпусах типа 2, в круглых типа 3, например 201.14- и 201.16-, 248.42-, зарубежные ИС в аналогичных корпусах DIP с шагом выводов 2, 5 мм

монтировались в отверстия плат. Для обеспечения надежности паяных соединений с осевыми и штыревыми выводами необходимо обеспечить оптимальный зазор в конструкции между поверхностями элементов.

В зависимости от конструкции печатной платы монтажное соединение может быть с неполным и полным заполнением припоем. В первом случае – меньшая механическая прочность соединения, возможность отслоения контактных площадок. Во втором случае требуется рациональный выбор зазора и большее время пайки, а также обеспечение паяемости металлизированного отверстия.

Для электронных сборок, использующих компоненты с осевыми выводами и ИМС со штыревыми выводами в корпусах типа DIP, монтируемыми в отверстия печатных плат или металлизированные отверстия ДПП и МПП (рис. 1.7) используют способы пайки погружением, когда собранная плата опускается в расплавленный припой.

Электромонтажные соединения должны проектироваться с обеспечением возможности визуального контроля паяного шва на всем его протяжении. Для печатного монтажа с металлизированными отверстиями галтели шва каждого из паяных соединений располагаются с обеих сторон печатной платы, и требование свободного доступа для двустороннего их осмотра приобретает важное значение. Невыполнение этого требования на этапе проектирования узлов ведет к производству заведомо ненадежных в эксплуатации изделий, ибо не позволяет обнаружить дефектные соединения и произвести их ремонт.

Паяные швы электромонтажных соединений должны быть без избытка припоя, иметь преимущественно скелетную форму с вогнутыми и непрерывными галтелями припоя по всему периметру соединения. Скелетная форма в отличие от заливной позволяет видеть контуры паяных соединений и с большей достоверностью оценивать качество монтажных соединений при их визуальном контроле.

Соединение пустотелых заклепок, лепестков, стоек их подобных конструктивных деталей с контактными площадками или печатными проводниками, выполненные методом развальцовки или расклепки, должны быть пропаяны по всему периметру развальцовки или расклепки. Поверхность галтелей припоя швов должны быть гладкой, глянцевой или светло-матовой без темных пятен, трещин, крупных пор, скопления мелких газовых и усадочных раковин, грубой зернистости, без игольчатых и дендритных образований, наплывов, брызг и выступов припоя, уменьшающих минимально допустимое расстояние между соединениями контактными площадками и печатными проводниками.

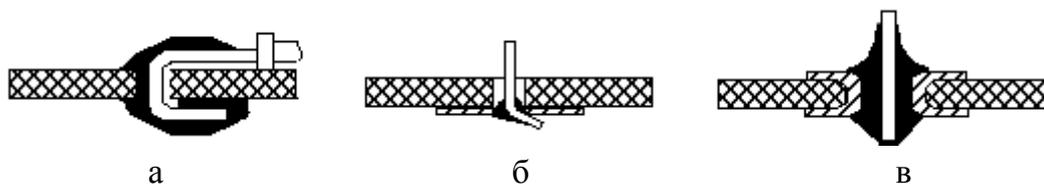


Рис. 1.7. Конструктивные формы паяных монтажных соединений: заливная (а), скелетная (б), в металлизированное отверстие (в)

Конструкция паяных электромонтажных соединений при любой компоновке и вариантах установки электронных компонентов на печатные платы должны обладать высокой ремонтпригодностью. Паяные соединения в отличие от сварных и контрольных наиболее полно удовлетворяют этому требованию и обеспечивают быструю и неоднократную взаимозаменяемость компонентов без повреждения их выводов и элементов печатного монтажа. Однако высокая ремонтпригодность паяных соединений может не реализоваться из-за просчетов, допускаемых при компоновке и выборе конструктивных вариантов установки компонентов на печатные платы, или из-за стремления любой ценой обеспечить высокую плотность монтажа.

Повышение производительности труда, качества и надежности паяных соединений может быть достигнуто за счет широкого внедрения механизированных и автоматизированных технологических процессов пайки. Однако возможности этих технологий используются далеко не полно из-за несовершенства конструкции монтажных элементов, печатных плат и соединений, подлежащих пайке. Необходимость повышения технологичности их конструкции вызывается специфическими требованиями групповых процессов пайки и следующих за ней операций.

Основные требования, которые групповая пайка предъявляет к конструкции деталей, поступающих на сборку, состоят в следующем.Metalлопокрытия на монтажных элементах, печатных платах и конструкционных деталях, входящих в собираемые изделия, должны обладать высокой паяемостью при пайке оловянно-свинцовыми припоями с применением спирто-канифольных флюсов, не вызывающих коррозии. Состав и свойства применяемых для металлопокрытий металлов должны исключать возможность растворения их в оловянно-свинцовых припоях и не образовывать с этими припоями интерметаллических соединений. Metalлопокрытия на монтажных элементах должны сохранять паяемость в течение всего срока складского хранения.

Лакокрасочные материалы для маркировки компонентов должны быть стойкими к воздействию флюсующих веществ, а также спирто-бензиновых смесей, трихлорэтилена и других растворителей, применяемых для отмывки остатков флюсов.

Для обеспечения высокой паяемости необходимо, прежде всего, взамен применяемого многообразия металлов и сплавов, а именно меди, золота, серебра, оловянно-висмутовых, оловянно-свинцовых и никелевых сплавов, использовать для металлопокрытий оловянно-свинцовые припои ПОССу 50-0,5, ПОССу 61-0,5 или ПОС 61, наносимые горячим способом. Целесообразность подтверждается производственным опытом и лабораторными исследованиями. Установлено, что все покрытия, нанесенные электролитическими методами, включая мед-

нение, серебрение и золочение, отличаются значительной пористостью и гигроскопичностью, которая вызывается наличием в порах коррозионно-активных остатков электролитов. По паяемости все эти покрытия значительно уступают монолитным беспористым оловянно-свинцовым покрытиям, нанесенным методом лужения. Кроме того, металлопокрытия, полученные электролитическим осаждением, имеют удельное сопротивление, в несколько раз больше, чем у исходных металлов и сплавов.

Резкое снижение или полная потеря паяемости через 15–30 дней складского хранения у серебряных покрытий, обусловлена чувствительностью их к воздействию сернистых соединений, всегда присутствующих в различных концентрациях в воздушной среде промышленных предприятий. Характерным недостатком покрытий драгоценными металлами является интенсивная растворимость серебра и золота в жидком олове. Пайка выводов монтажных элементов, покрытых драгоценными металлами, с применением обычных оловянно-содержащих припоев сопровождается высокой скоростью химической реакции между оловом и серебром или золотом с образованием хрупких интерметаллидов Ag_2Sn_2 , Ag_2Sn или AuSn , AuSn_2 , AuSn_2 , которые снижают механическую прочность и электропроводность соединений.

Опасность появления золото-оловянных интерметаллидов устраняют за счет удаления золотого покрытия с монтажных элементов перед их пайкой или применением при пайке безоловянных специальных припоев, содержащих золото, индий, серебро или свинец. Проблема повышения в 4–6 раз сроков сохранения паяемости металлопокрытий на выводах компонентов решается улучшением качества припоя, условий хранения, в том числе герметизацией упаковочной тары, или консервацией металлопокрытий на стадии изготовления компонентов флюсами покрытиями. Для совершенствования технологичности конструкции изделий защищают маркировку прозрачными покрытиями, стойкими к воздействию флюсов и растворителей, применяемых при групповых механизированных процессах флюсования и отмывки остатков флюсов.

1.4. Планарный и поверхностный монтаж электронных компонентов

Монтаж корпусов с планарными выводами требует точного совмещения вывода с площадкой (фиксация элемента) в течение короткого времени пайки. В частности, корпуса ИС типа 4 (401.14-, 402.16-, 405.24-, 429.42- и другие) и аналогичный корпусу 401.14- зарубежный корпус "Flat-Package" с шагом выводов 1,25 мм и ряд типов перспективных корпусов с повышенным числом выводов, размещаемых по всему периметру корпуса с шагом 1,25; 1,0; 0,625 и 0,5 мм, а также различные сборки (резисторные, конденсаторные и др. (рис. 1.8).

Поверхностный монтаж (SMT) как конструктивно-технологическое направление для миниатюризации электронной аппаратуры четвертого поколения (рис. 1.9) получил развитие в 80-е годы. Эта технология позволила уменьшить

габариты конструкции, снизить расход материалов, а малая масса компонентов уменьшает их восприимчивость к воздействиям вибрации, что особенно важно для надежной работы аппаратуры

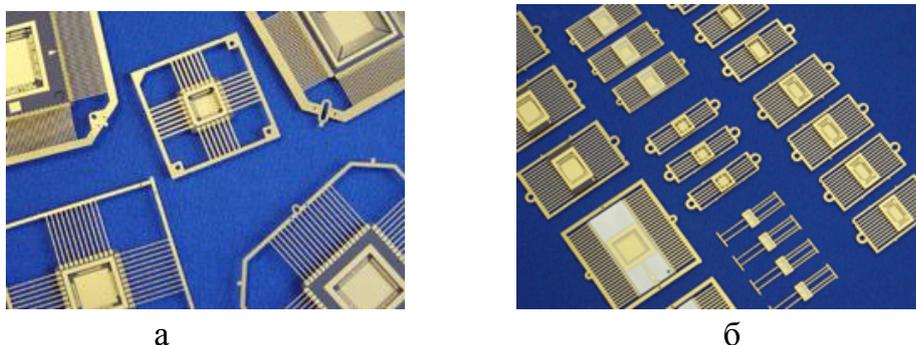


Рис. 1.8. Плоские корпуса ИС с планарными выводами: CQFP (а) и Flat Pack (б)

Уменьшение длины выводов и соответствующее снижение паразитных индуктивностей, емкостей и сопротивлений приводит к улучшению электрических параметров и увеличению надежности аппаратуры.

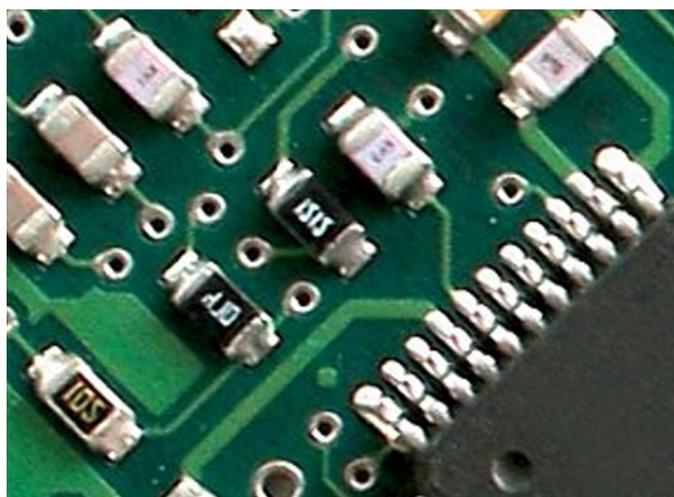


Рис. 1.9. Поверхностный монтаж электронных компонентов

Применительно к поверхностному монтажу существуют почти все типы компонентов: конденсаторы, резисторы, транзисторы, диоды, катушки индуктивности, интегральные схемы и разъемы. Чип-резистор – наиболее простой SMD-компонент (рис. 1.10). Он состоит из прямоугольной керамической подложки с торцами, металлизированными обычно покрытием серебро-палладий. Резистивная паста, как правило, на основе диоксида рутения (RuO_2) по толсто-пленочной технологии наносится через трафарет между выводами и подвергается обжигу [7].

Далее резистивная пленка покрывается защитной свинцово-боросиликатной стеклянной пленкой. Барьерный подслои никеля обычно используется для пре-

дотвращения 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 нашел применение в слуховых аппаратах и мобильных телефонах.

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

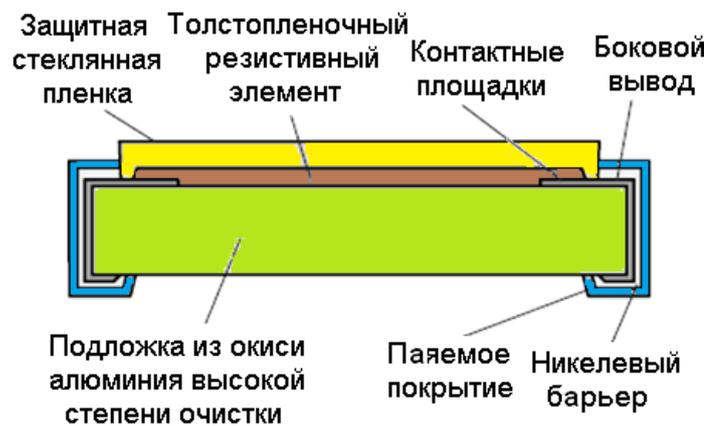


Рис. 1.10. Чип-резистор

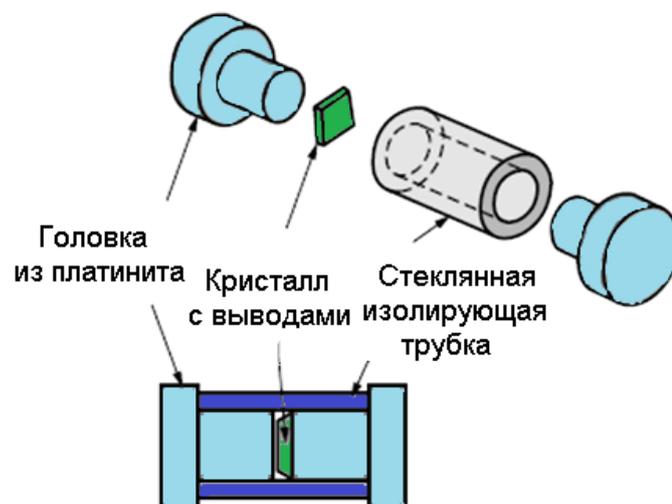


Рис. 1.11. Резистор MELF

Наиболее широко используемые в технологии поверхностного монтажа чип конденсаторы — многослойные керамические конденсаторы, состоят из нескольких слоев металлических электродов, разделенных слоями керамического диэлектрика (рис. 1.12). Требуемая емкость конденсатора обеспечивается соответствующим количеством слоев. Конструкция торцевых выводов подобна той, что и в чип резисторах. Чип конденсаторы группируют по удельной емкости и термостабильности:

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

В чип индуктивностях используется керамический или ферритовый стержень с вертикальной или горизонтальной обмоткой из тонкой медной проволоки в эмалевой изоляции (рис. 1.13). Чип-индуктивность обычно герметизируют эпоксидной смолой. 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.

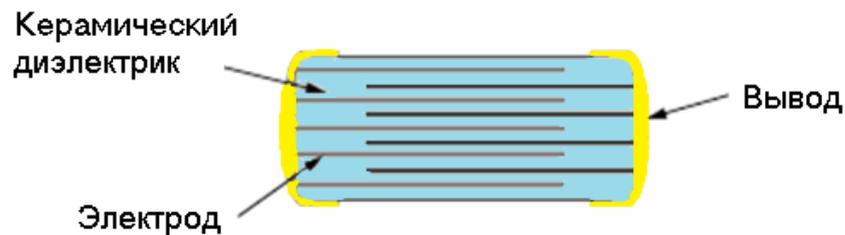


Рис. 1.12. Конструкция многослойного керамического чип конденсатора

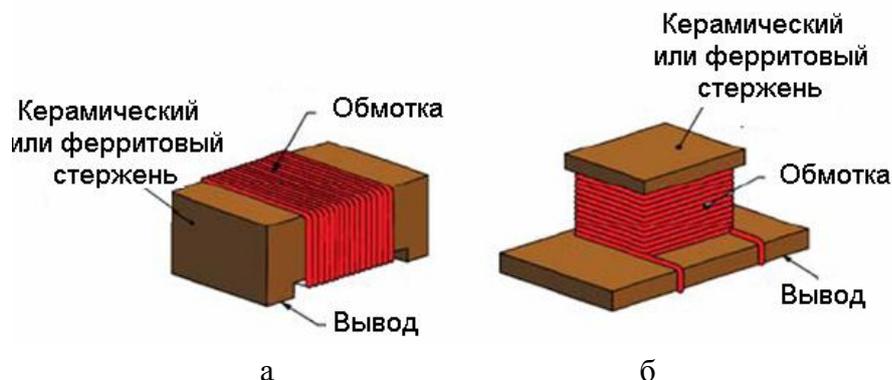


Рис. 1.13. Чип индукторы: с вертикальной (а) и с горизонтальной (б) обмоткой

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

- малогабаритный корпус (SOIC),
- тонкий корпус с уменьшенным расстоянием между выводами (TSOP),
- пластмассовый 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 (рис. 1.14). Выводы, напоминающие формой крыло чайки (рис. 1.14,а) — наиболее распространены в случае применения изделий с малым шагом выводов. Однако эти выводы подвержены повреждениям при сборке.

Корпуса с J-выводами (рис. 1.14,б) более удобны в производстве, однако отличаются сложностью контроля и ремонта. I-выводы (рис. 1.14,в) более просты в изготовлении, чем выводы типа «крыло чайки» и J-выводы, но не широко распространены из-за возможности снижения надежности паяных соединений «в стык». На рис. 1.14,г показана конфигурация паяных соединений безвыводных керамических кристаллодержателей микросхем. По мере миниатюризации корпусов возникает проблема надежности соединений, особенно из-за несовпадения температурных коэффициентов расширения материалов, трудности удаления остатков флюса из-под компонентов из-за малого зазора между ними и подложкой.

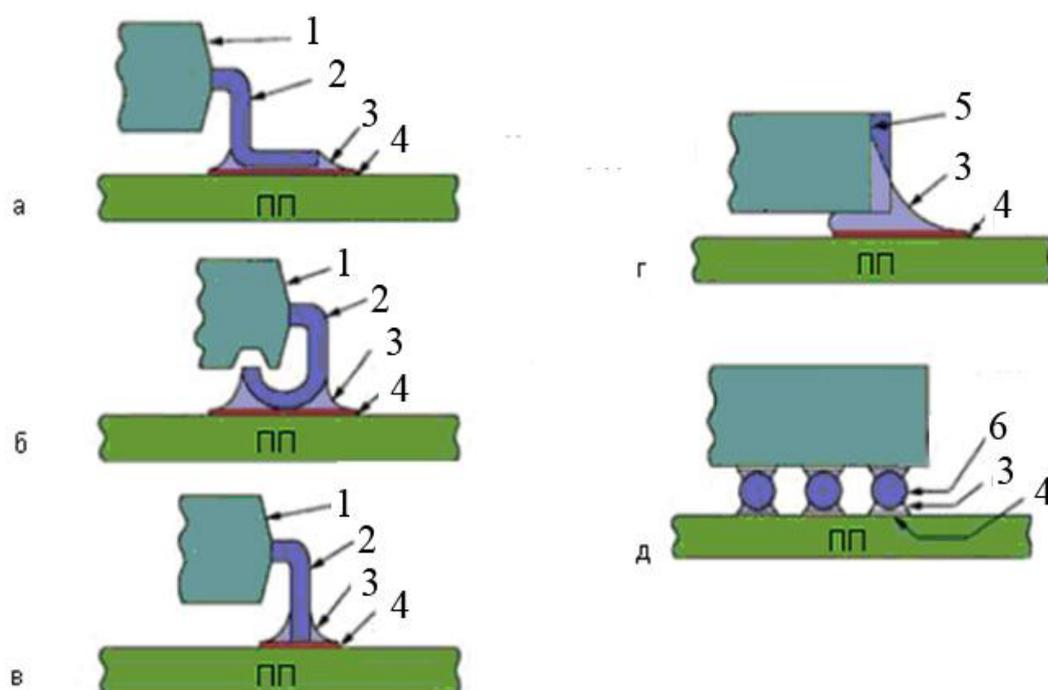


Рис. 1.14. Конфигурация выводов корпусов ИС: а) «крыло чайки»; б) J-вывод; в) I-вывод; г) безвыводная металлизация; д) шариковый вывод
1 – корпус ИС; 2 – вывод; 3 – паяное соединение; 4 – контактная площадка; 5 – металлизация; 6 – шариковый вывод

Паяное соединение компонентов BGA показано на рис. 1.14, 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. Поэтому микросхемы в корпусах BGA, если преодолеть все технологические трудности их монтажа и демонтажа, составляют серьезную альтернативу другим корпусам.

1.5. Непосредственный монтаж кристаллов и микрокорпусов

Полупроводниковый кристалл в изделии должен быть изолирован от внешней среды защитным слоем. Традиционно для этого применяют корпус, также выполняющий роль носителя межкомпонентных соединений с внешней электрической цепью изделия. Стандартные корпуса приборов, несмотря на кажущееся богатство вариантов, предоставляют конструкторам довольно скудный выбор: регламентировано количество и расположение выводов, размер и форма корпуса. Если кристалл содержит 190 выводов, а ряд стандартных корпусов состоит из вариантов с 188 и 244 выводами, то приходится ставить кристалл в гораздо больший по габаритам и более дорогой корпус.

При таком подходе страдают изготовители специальной и мелкосерийной электронной аппаратуры. Корпуса с количеством выводов от 100 довольно дороги (стоимость металлокерамического корпуса с 256 выводами достигает 250 евро). Зачастую стоимость сложного специализированного кристалла меньше, чем стоимость корпуса для него. Вследствие особенностей расположения контактных площадок в стандартных корпусах разработчику кристалла, и особенно технологу сборочного производства, приходится проявлять чудеса изобретательности, чтобы провести сварку. Кристаллы специализированных ИС, например, GPS-контроллер, производятся, как правило, в небольших количествах, а ассортимент корпусов еще меньше, чем для стандартных функциональных микросхем.

Бескорпусные ИС с проволочными и объемными выводами монтируются на контактные площадки платы микросваркой или пайкой (рис. 1.15).

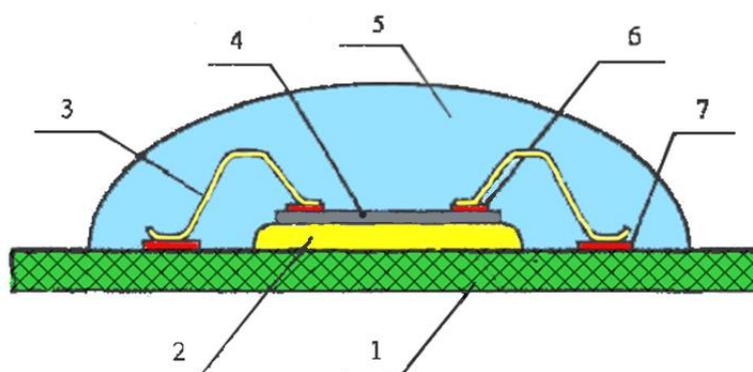


Рис. 1.15. Монтаж кристалла на плате: 1– плата, 2– адгезив, 3– проволока, 4– кристалл, 5– заливочный компаунд, 6– контактная площадка на кристалле, 7– контактная площадка на плате

Автоматизированный монтаж кристаллов на гибких полимерных носителях выполняют групповой пайкой для медных выводов или сваркой алюминиевых выводов. Технология COB предлагает гибкий, недорогой и универсальный путь, альтернативный применению корпусов. С некоторыми оговорками он может заменить корпусные изделия. Печатную плату с заданным количеством выводов можно неоднократно модифицировать, изменяя топологию. Применение COB позволяет разработчикам на этапе проектирования и отработки конструкции выпускать функционально-годные изделия серий от 10 штук, не затрачивая при этом больших средств на производство заказных корпусов.

После сварки кристалл и зона сварки заливаются компаундом, который надежно герметизирует чувствительную к внешней среде часть изделия. Применяются силиконовые составы, сохнувшие при комнатной температуре; эпоксидные составы, требующие отверждения при температурах от 60°C, и другие полимеры ультрафиолетового и инфракрасного отверждения. Заливка непрозрачным компаундом кристалла, помимо утилитарной, имеет еще одну функцию: она затрудняет идентификацию, разборку изделия и копирование примененных в нем технических решений, в то время как корпус позволяет легко получить доступ к топологии микросхемы или специализированного кристалла. Дополнительным преимуществом COB монтажа является возможность «спрятать» или разместить на той же плате, что и кристалл, пассивные и вспомогательные компоненты практически без ограничений. Таким образом, технология COB, помимо миниатюризации изделия, снижения его массогабаритных показателей, уменьшает время и стоимость разработки нового изделия, сохраняя сравнительно высокий уровень безопасности интеллектуальной собственности.

Кристаллы микросхем монтируют на подложку следующими методами:

- с помощью ленточного носителя или ТАВ (Tape-automated Bonding), когда кристаллы 1 с малым шагом выводов присоединяются к выводам 2 ленточного носителя 3 (рис. 1.16.а) на автоматическом оборудовании, что обеспечивает возможность предварительного тестирования кристаллов перед окончательной установкой его на монтажную подложку;
- методом перевернутого кристалла (Flip Chip) через шариковые выводы (рис. 1.16,б), что повышает компактность изделия и улучшает электрические характеристики межсоединений.

Матричная система выводов в корпусах типа BGA обеспечивает ряд важных преимуществ: минимальную площадь монтажного поля подложки; наличие свободных мест для размещения теплоотвода на подложку; высокую функциональную производительность электронных модулей за счет меньших паразитных

эффектов; упрощение технологии за счет оплавления припоя при групповом нагреве.

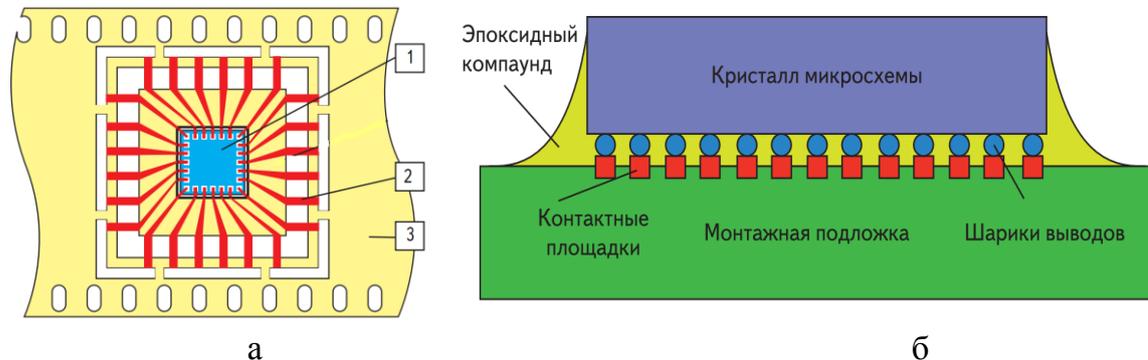


Рис. 1.16. Монтаж кристаллов методами TAB (а) и Flip Chip (б)

Основной корпус BGA является миниатюрная печатная плата или «lead frame» («выводная рамка»), изготавливаемая из эпоксидного стеклопластика (рис. 1.17) FR4 или FR5, который имеет высокую температуру стеклования (170–215°C) и теплостойкость 230°C в течение 30 мин.

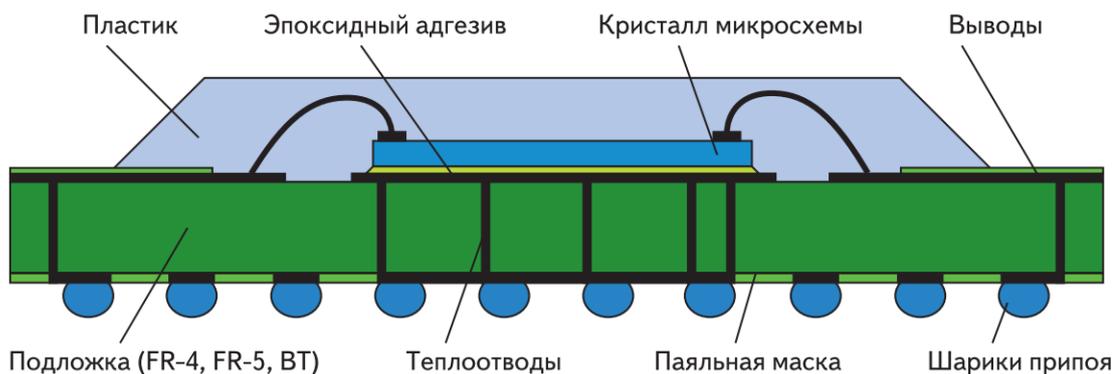


Рис. 1.17. Конструкция корпуса BGA

Для изготовления печатной платы используют двухсторонний фольгированный диэлектрик толщиной 0,2 мм с 0,18 мкм медной фольгой, сухую припойную маску толщиной 50,8 мкм, которая закрывает все переходные отверстия на печатной плате. Кристалл устанавливают на верхнюю сторону платы на эпоксидный компаунд с серебряным наполнением, разваривают термокомпрессией с использованием золотой проволоки на контактные площадки с переходными отверстиями, к которым на противоположной стороне платы прикреплены шариковые выводы [8]. Эти выводы расположены в узлах прямоугольной сетки с шагом: 1,0; 1,27 и 1,5 мм – нормированных JEDEC. Разваренный на плату кристалл заливают компаундом, обеспечивая надежную герметизацию конструкции.

Шариковые выводы диаметром 0,762 мм изготавливают отдельно из эвтектического сплава 62Sn36Pb2Ag с температурой плавления 179°C и устанавливают в углубления на нижней стороне платы на пастообразный флюс при помощи

специального приспособления. Распайку выводов на плату производят в конвекционной печи в среде защитного газа (азота) в соответствии со стандартным температурным профилем при максимальной температуре 230°С. После оплавления, для удаления остатков флюса, волокон и других посторонних частиц, плату промывают на центрифуге с использованием не содержащего фреонов органического растворителя Tempole.

Отношение размера кристалла к размеру корпуса постоянно увеличивается и приближается сегодня к 70%. Для преодоления ситуации, в которой размер кристалла увеличивается быстрее, чем размер корпуса, компании разрабатывают корпуса, в которых некоторые кристаллы располагаются вертикально в виде стеков. Другим ключевым аспектом корпусов является управление проблемами увеличения количества выводов и сборки приборов с малым шагом выводов.

1.6. Микросварные соединения в интегральных микросхемах и микросборках

Одним из наиболее распространенных способов электрического соединения между контактными площадками кристалла и выводами корпуса, применяемых в настоящее время, является соединение с помощью проволочных выводов. Проволочный монтаж остается одним из основных методов сборки ИС, что объясняется высокой автоматизацией процесса, универсальностью по отношению к технологическим вариантам производства и геометрическими размерами ИС. Прогресс в развитии методов формирования межсоединений в изделиях интегральной электроники позволил существенно снизить трудоемкость этих операций и добиться заметных успехов на пути к их полной автоматизации. Однако трудоемкость операций формирования межсоединений остается определяющей в процессе производства изделий микроэлектроники и составляет от 30 до 60 % всей трудоемкости сборки. При этом на долю разрушения межсоединений приходится значительный процент отказов микросхем в процессе эксплуатации.

Широко применяются следующие технологические процессы формирования межсоединений: соединение проволокой; на ленточных носителях и сборка методом перевернутого кристалла. Сборка более, чем 90% корпусов БИС, связана с технологией монтажа межсоединений золотой и алюминиевой проволокой.

Метод соединения проволокой для монтажа полупроводниковых микросхем, впервые примененный в производстве транзисторов фирмой Bell Laboratories (США) в 1956 г., часто подвергался сомнению в отношении его экономичности при монтаже микросхем в корпуса. На протяжении длительного времени различные технологии группового присоединения, например, методом перевернутого кристалла, с помощью балочных выводов, группового монтажа с помощью «паучковых» выводов, являлись основными его конкурентами. Однако большинство этих методов не нашли широкого применения в основном из-за недостаточной универсальности и большого количества дополнительных требо-

ваний, предъявляемых к кристаллам и выводам приборов. Основное достоинство групповых методов — обеспечение высокой производительности — стало практически незаметным после появления высокоскоростных автоматических установок присоединения проволочных выводов. Типичные микросварные соединения типа “клин-клин” проводников круглого сечения показаны на рис. 1.18.

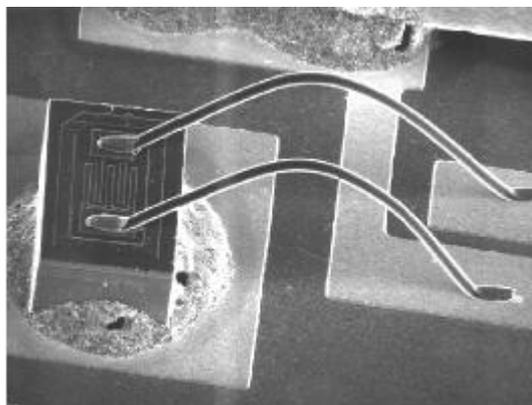


Рис. 1.18. Микросварные соединения типа “клин-клин”

Процесс сварки состоит из трех стадий: образования физического контакта, активации контактных поверхностей и объемного взаимодействия. При сварке одноименных металлов первые две стадии сливаются в одну: одновременно с образованием физического контакта вокруг дефектов структуры—дислокации, вакансий—образуются активные центры и наступает объемное взаимодействие. Развитие первых двух стадий образования соединения зависит от скорости пластической деформации. Независимо от характера и интенсивности деформационного и термического воздействия на соединяемые материалы в зоне контакта природа образования соединения одинакова. Различна кинетика протекания отдельных стадий процесса, которая определяется условиями нагрева, характером и интенсивностью деформации проводника, степенью локализации деформации и особенностями развития релаксационных процессов в приконтактной зоне. Длительность процесса образования прочных связей по всей площади взаимодействия определяется скоростью пластической деформации, и, следовательно, третий параметр процесса микросварки — время, влияющий на его производительность, является зависимым. Поскольку сварка в твердой фазе — процесс трехстадийный, перспективными можно считать способы сварки с циклическим повышением усилия нагружения и температуры (для ТКС), усилия нагружения и амплитуды колебаний (для УЗС) и совокупного воздействия этих факторов при ТЗС. Это позволяет использовать наиболее эффективные стадии активной деформации и неустановившейся ползучести.

Термокомпрессионной сваркой (ТКС) соединяют металлы в твердом состоянии при контролируемой ограниченной диффузии, относительно высоких удельных давлениях и нагреве до температуры ниже температуры образования

эвтектики соединяемых материалов. Поскольку в обычных условиях реальные поверхности свариваемых материалов покрыты оксидными пленками, то образование прочного сварного соединения может произойти при условии деформации в зоне контактирования. Деформация может обеспечить механический контакт соединяемых материалов и разрушение адсорбированных поверхностных и оксидных пленок. При соприкосновении чистых поверхностей свариваемых элементов может произойти «схватывание». Области «схватывания» возникают на участках, где возможны взаимодействия между свободными элементами двух разнородных атомов и образование межатомной связи. Необходимая энергия для преодоления энергетического барьера поверхностных атомов, т. е. повышения их энергии до определенного уровня, при котором может произойти взаимодействие, вводится в результате пластической деформации и нагрева.

При деформации присоединяемого проводника в местах максимальных касательных напряжений возникают дислокации на контактных поверхностях тонкопленочных покрытий. Повышение плотности дислокации приводит к развитию участков «схватывания» и площади взаимодействия, однако увеличение температуры, давления и длительности процесса может вызвать образование дислокации в полупроводнике. Это явление нежелательно при сборке ИС и полупроводниковых приборов с небольшой глубиной залегания р-п перехода.

В качестве материалов выводов используются только высокопластичные металлы (алюминий, золото, серебро, медь), присоединение которых может осуществляться при температуре до 320°C , что ниже температуры образования дислокации в полупроводниках (для кремния 450°C) [9].

Наиболее эффективным при термокомпрессии является одновременный нагрев прибора и инструмента, что позволяет обеспечить строгое поддержание температуры в зоне сварки. Установлено, что при температурах более 360°C разрушение оксидной пленки при сварке происходит с последующим образованием интерметаллидных фаз, богатых золотом. Последние имеют плохую адгезию с поверхностью оксида кремния, вызывают хрупкость соединения и снижают надежность контактов. Интерметаллидные соединения способствуют появлению трещин и пор в контакте, образованию тройной эвтектики Si–Al–Au с невысокой температурой плавления. Избежать этого можно, применив однородные материалы, например Al–Al.

При термокомпрессии "внахлестку" капилляр с усилием около 25 г прижимает золотую проволоку к нагретой до 300°C контактной площадке кристалла на подложке. После приварки проволоки к внешнему выводу корпуса происходит ее отрезание с одновременным формированием "сапожка" для следующего присоединения. Метод применяют в ИС, где требуется присоединение проволоки к нескольким контактными площадкам без ее обрыва. Метод не рекомендуется для приварки плоских проводников, так как при их деформации мало течение металла в плоскости контакта, что затрудняет образование соединений.

Сварка давлением с импульсным косвенным нагревом находит применение для сборки микросхем. Столик установки, где крепится микросхема, подогревается от 50 до 300⁰С. Сварочный электрод разогревается до 600⁰С. Используется два электрода: один служит для присоединения проводника к контактной площадке микросхемы, второй - к внешним выводам корпуса. Длительность теплового импульса 0,3–3,0 с. Преимущество способа состоит в том, что он исключает нагрев изделия до температуры, близкой к температуре плавления эвтектики золото–кремний, применяемой для пайки кристалла к корпусу.

При сварке расщепленным электродом проводник прижимается к контактной площадке двумя электродами, расположенными с небольшим (0,1–3,0 мм) зазором друг от друга. При приложении напряжения к электродам происходит локальный нагрев проводника в месте контакта. Этот способ применяется для присоединения плоских ленточных выводов к пленкам на подложках.

Ультразвуковой сваркой (УЗС) соединяют металлы в твердом состоянии посредством введения УЗ энергии в зону сварки. Сближение свариваемых изделий и образование соединения происходит при пластической деформации материалов от совместного воздействия усилия напряжения и тепловой энергии за счет процессов трения и воздействия на материалы энергией УЗ частотой, как правило, 66±10 % кГц для микросварки. Этот метод наиболее перспективен при выполнении технологических операций сборки различных типов полупроводниковых приборов алюминиевой проволокой. К основным достоинствам метода УЗС следует отнести: возможность соединения широкой номенклатуры материалов; получение соединений материалов с окисленными поверхностями.

Образование сварного соединения определяется, с одной стороны, колебательной скоростью, давлением сварочного наконечника и временем сварки, а с другой стороны, свойствами свариваемых металлов и поверхностных пленок. Ввод энергии ультразвука в сопряженные на малом участке металлы вызывает повышение температуры в зоне их контакта, растрескивание твердых и выгорание жировых пленок, пластическое деформирование материала, интенсивную диффузию, рекристаллизацию, плавление и другие явления.

Наиболее существенным условием свариваемости металлов в твердом состоянии является разница в атомных диаметрах свариваемых металлов, которая не должна превышать 15–18 %. При различии диаметров от 19 до 44 % схватывания металлов не происходит. Предельная величина относительной разности диаметров совпадает с общим условием существования твердых растворов металлов, что дает возможность установить свариваемость из фазовой диаграммы для данной пары металлов. Металлы свариваются в случае полной или ограниченной растворимости в твердом состоянии. Сварка возможна и при отсутствии растворимости, если удастся подобрать третий растворяющийся металл, который наносится на один из свариваемых металлов. В общем случае ровные и чистые (тщательно обработанные) контактные поверхности свариваются лучше. И, наоборот, грубая механическая обработка свариваемых поверхностей, нали-

чие различных поверхностных пленок, плакирование, как правило, ухудшают свариваемость металлов, а в ряде случаев и исключают её. Благоприятными условиями для схватывания является совпадение зерен с близкой кристаллографической ориентацией.

Процесс УЗС в технологическом плане обусловлен параметрами режима сварки: мощностью колебательной системы, контактным давлением, амплитудой колебаний сварочного наконечника и временем сварки. Он сопровождается увеличением температуры в зоне сварки до $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ при усилии сжатия до 2–2,5 Н. Это подтверждает предположение о том, что источником тепла при УЗС является трение между свариваемыми металлами при их относительном перемещении.

Качество соединений определяется в основном физико-химическими свойствами соединяемых поверхностей. Изменение микрорельефа поверхностей и структуры материалов, наличие окисных и адсорбированных пленок приводит к дестабилизации процессов микросварки (что требует корректировки технологических режимов), ухудшению качества и надежности сварных соединений, снижению производительности процесса.

Термозвуковая сварка (ТЗС) находит все возрастающее применение при сборке изделий микроэлектроники. В ТЗС соединения формируются в результате совместного действия температуры, энергии ультразвуковых колебаний сварочного инструмента и усилия нагружения инструмента. Данный способ сварки объединяет отдельные качества ТЗС и УЗС и дает хорошие соединения при существенном смягчении режимов сварки, прежде всего температуры. ТЗС используется в первую очередь при автоматизированной сборке приборов, критичных к температурам свыше $200\text{—}250\text{ }^{\circ}\text{C}$. К таким относятся быстродействующие приборы на арсениде галлия, заказные БИС и СБИС. Применим этот способ сварки и для сборки толстопленочных ГИС. Качественные, устойчивые к повышенным температурам ($150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3000 ч) и термоциклированию (100 циклов; — $55\text{...}+150\text{ }^{\circ}\text{C}$) соединения золотой проволоки с медными печатными проводниками получают ТЗС при температуре подложки $105\text{—}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10]. ТЗС широко применяется для сборки ИС и БИС массовых серий с целью смягчения режимов и снижения критичности сварочного процесса к колебаниям качества соединяемых материалов.

1.7. Соединения в многокристальных модулях

Проблемы, связанные с отводом тепла, становятся невероятно сложными по мере того, как рабочие частоты микропроцессов приблизились к 1 ГГц, а емкость ИС памяти превысила 64 Мбит. Когда число имеющихся на кристалле входов – выходов более нескольких сотен, разработчики должны использовать весьма сложные решения для реализации соединений между плотноупакованными схемами.

Многокристальные модули (МКМ) позволяют обеспечить высокое быстродействие благодаря тому, что длины соединений в них в 10 – 100 раз короче, чем на стандартных печатных платах. Расстояние между кристаллами может быть составлять всего лишь 0,25 – 0,5 мм. Использование МКМ позволяет избавиться от целого уровня в сборочной иерархии и исключить соответствующие времена задержки. Потенциальными областями применения МКМ являются центральные процессоры, ЗУ, графические подсистемы, сетевые и встроенные контроллеры.

Хотя многокристальная технология позволяет решить две серьезные проблемы, стоящие перед разработчиками систем, она одновременно ставит ряд новых проблем. Одна из них связана с необходимостью охлаждения десятков кристаллов, работающих на частотах 50–100 МГц внутри маленького корпуса. Например, компьютер с сокращенным набором команд (PISC), состоящий из нескольких кристаллов СБИС, может рассеивать до 70 Вт. Охлаждаемые воздухом модули позволяют работать при мощности около 15 Вт, но, использование теплоотводов дает возможность создавать МКМ, содержащие схемы, которые выделяют от 50 до 75 Вт.

МКМ отличаются от печатных плат и гибридных сборок отношением площади кристаллов к площади подложки. Этот важный показатель определяется в основном системой межсоединений. В печатных платах и гибридных сборках отношение суммарной площади кристаллов к площади подложки составляет не более 15%. Благодаря использованию тонкопленочной фотолитографии в МКМ оно может быть доведено до 90%, поскольку технология позволяет наносить любой проводник (медь, алюминий, золото) на подложки и получать проводящий рисунок с разрешающей способностью около 10 мкм.

Эффективность упаковки, т.е. отношение площади, занимаемой компонентами, к общей площади подложки, получаемая при использовании кремниевых МКМ, значительно выше, чем при других методах сборки (табл. 1.3) [11]. Сложная задача, возникающая при разработке МКМ, заключается в отыскании и соединении материалов с нужным сочетанием электрических, механических и тепловых свойств. При этом почти всегда неизбежны компромиссы, конкретный характер которых зависит от области применения. Конструкция корпусов с МКМ включает три основных элемента: подложка, диэлектрик и межсоединения.

Для изготовления МКМ часто используется керамика. Подложки на основе оксида алюминия уже более 20 лет назад использовались при изготовлении толстопленочных гибридных и мощных модулей. По сравнению с обычными слоистыми пластиками они обладают более высокой теплопроводностью, обеспечивают повышенную механическую прочность и позволяют уменьшить ширину металлизированных дорожек и зазоров между ними на один – два порядка величины. Однако они имеют такие недостатки, как высокую диэлектрическую проницаемость и коэффициент теплового расширения, отличающийся от

КТР кремния. Их диэлектрическая проницаемость вдвое больше, чем у плат FR-4, что ограничивает скорость прохождения сигналов и не позволяет в полной мере использовать выгоды, связанные с уменьшением длины соединений. Отрицательную роль играет паразитная емкость границы раздела между подложкой и проводником.

Таблица 1.3. Сравнение различных технологий сборки

Технология сборки	Размеры линий и зазоров, мкм	Эффективность упаковки, %	Количество ИС на кв. дюйм
Интегральные схемы	0,3–3,0	100	—
Кремниевые МКМ	10–50	30–60	8–20
Кристалл на плате	100–200	15–30	5–9
Гибридные толсто пленочные схемы	125–250	10–30	3–8
Поверхностный монтаж	125–250	6–14	2–4
Многовыводные корпуса на печатной плате	100–200	5	0,3– 1,0
Корпуса DIP на печатной плате	200–300	1–3	1–2

Эти трудности можно устранить, если использовать стеклокерамику, имеющую диэлектрические свойства, аналогичные свойствам печатных плат. Одно из преимуществ стеклокерамики, заключается в том, что ее коэффициент теплового расширения ($30 \cdot 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$) близок к КТР кремния ($26 \cdot 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$), а у оксида алюминия составляет $60 \cdot 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$. Это означает, что при использовании стеклокерамики паяные соединения будут обладать более высокой усталостной прочностью, так как при циклах термического расширения и сжатия между кристаллом и подложкой возникают меньшие термомеханические напряжения.

Кремний – идеальный материал для подложек многокристалльных модулей, так как он обладает тем же самым коэффициентом теплового расширения, имеет высокую теплопроводность и низкую диэлектрическую проницаемость. Он также позволяет создавать в подложке нагрузочные резисторы и развязывающие конденсаторы (рис. 1.19).

Полиимид – также широко используемый в МКМ диэлектрик, так как его просто нанести и на кремний, и на керамические подложки. В любом случае проводящие дорожки обычно состоят из полиимида на меди. Такое сочетание дает минимальные задержки распространения сигнала. Для подобных применений лучше всего подходят малонапряженные полиимиды и полиимидные цепочки с терминальными ацетиленовыми группами.

Существует несколько методов получения межсоединений в МКМ между кристаллом и подложкой. Один из них, «начнем с кристалла», заключается в том, что кристаллы размещаются лицевой стороной вверх в углублениях, предварительно созданных в керамических подложках.

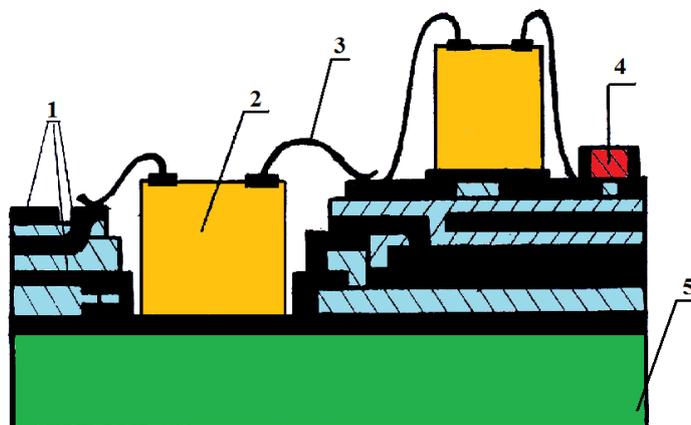


Рис. 1.19. Структура МКМ на кремниевой подложке: 1 – сигнальные слои, 2 – кристалл, 3 – микросварное соединение, 4 – резистор, 5 – кремниевая подложка

Затем над кристаллами размещается полиимидная пленка, и в результате образуется плоская поверхность. После этого на полиимид наносятся соединения с высокой плотностью дорожек (обычно медные). Сквозные соединительные отверстия и открытые участки для осуществления внешних соединений создаются лазерной обработкой. Затем нанесением в центрифуге или пульверизацией «надстраиваются» дополнительные слои из полиимидных пленок.

Альтернативный путь создания МКМ можно назвать «закончим кристаллом». Этот подход удобен как для кремниевых, так и для керамических подложек. В данном случае перед монтажом кристаллов на поверхность подложки наносят алюминиевые или медные межсоединения. В зависимости от типа подложки в качестве диэлектрика служит двуокись кремния или полиимид. После создания межсоединений кристаллы монтируются или лицевой стороной вниз (Flip Chip), или с использованием ленты – носителя. Чтобы полиимид не окислял медь, и в результате этого не повышалась диэлектрическая проницаемость границы раздела, на медь наносят защитное покрытие из хрома, никеля или титана. Одно из преимуществ, связанных с нанесением меди или алюминия на двуокись кремния, заключается в том, что поверхностные проводники могут быть изолированы с помощью возвышений, созданных из оксида. Это позволяет вдвое уменьшить емкость межсоединений и снизить задержки прохождения сигнала при эффективном значении диэлектрической проницаемости, равном 1,9.

Метод создает возможности формирования многофункциональных структур. Возможно создание резистивных слоев, которые могут заменить дис-

кретные компоненты, замыкающие дорожки с сопротивлением 50 – 100 Ом. Диэлектрик, разделяющий слои заземления и питания, образует интегральный развязывающий конденсатор, распределенный над многослойной структурой металл – окисел – металл. Разрабатываются «подложки – заготовки», которые могут выпускаться в массовых количествах и сохраняться для будущего использования. Эти подложки, в которых будут созданы слои питания, заземления и передачи сигналов по осям X и Y, могут быть при необходимости быстро доработаны в соответствии с конкретным заказом. Этот подход получил название QTAI (quick – turn – around interconnect – быстро разрабатываемые соединения).

Одним из методов формирования соединений в МКМ является метод внутреннего монтажа, который содержит следующие этапы:

- На подложке из алюминия пробиваются прямоугольные отверстия, соответствующие размерами кристаллов ИС, в керамической или поликоровой подложке отверстия прожигаются лучом лазера.
- На подложке анодированием формируется диэлектрический слой.
- Кристаллы ИС размещаются в отверстия подложки так, чтобы верхняя сторона кристаллов, содержащая контактные площадки, находилась наверху.
- На подложку с уложенными кристаллами наносится полиимидная пленка толщиной 12 мкм, к которой затем прикладывается давление 0,5 МПа и нагрев до 350°C, в результате чего лицевая сторона каждого кристалла ИС приклеивается к основанию.
- Ионно-химическим травлением в полиимидной пленке формируются отверстия, вскрывающие контактные площадки ИС.
- Сформированную таким способом подложку размещают на столе из магнитного материала. Сверху на подложку, с высокой точностью, накладывают маску (фольгу из кобальта с тонкими прорезями), и стол плотно прижимает ее к подложке.
- Методом вакуумного напыления через маску формируют токоведущие дорожки из меди (предварительно напыляется подслой титана для обеспечения высокой адгезии) и никеля (защитного слоя). Ширина проводников 50 или 70 мкм. В результате без использования пайки и сварки получается соединение контактных площадок ИС с токоведущими дорожками платы. После нанесения слоев Ti–Cu–Ni маска снимается с подложки.
- На полученную топологию первого слоя вновь наносятся полиимидная пленка, в которой ионным травителем вскрываются переходные межуровневые отверстия, и через вторую маску формируют второй слой разводки с контактными площадками. Одновременно со вторым уровнем топологии формируют переходные соединения верхнего и нижнего уровней.

- На наружные контактные площадки микромодуля наносится припойная паста, устанавливаются и паяются поверхностно-монтажные компоненты.

Таким образом, можно сформировать до 30 слоев платы с смонтированными в нее ИС. На верхнем слое формируются контактные площадки для пассивных элементов, присоединяемых к ним методом поверхностного монтажа. Высокая плотность монтажа достигается исключением выводов ИС, отсутствие сварных и паяных контактов, формированием проводников шириной 50–70 мкм, а при необходимости – 0 мкм. Диаметр переходного отверстия не более ширины проводника. Габариты модуля по технологии «внутреннего монтажа кристаллов» уменьшаются до 10 раз по сравнению с традиционной технологией монтажа и корпусирования. Пятикратное увеличение надежности обеспечивают следующие факторы:

- отсутствие выводов ИС, и следовательно, паяных и сварных соединений этих выводов с контактными площадками платы;
- формирование проводника сухим методом без применения травителей, вызывающих деградацию тонких проводников ПП;
- близость значений коэффициентов линейного расширения кристалла, оксидного защитного слоя подложки, керамических корпусов конденсаторов и ситалловых корпусов резисторов гарантирует безотказную работу блоков при резких перепадах температуры;
- кристаллы, уложенные в алюминиевую или керамическую подложку, находятся в условиях постоянной тепловой разгрузки;
- подложка из алюминия защищает схемы от электромагнитного воздействия.

Конструкция электронного модуля может состоять из следующих элементов:

- Коммутационной объединительной платы из стали с полиимидным диэлектрическим слоем, на котором методом свободных масок сформирована разводка. Во многих случаях в качестве коммутационной платы может быть использована задняя стенка прибора.
- Микромодулей, изготовленных по технологии внутреннего монтажа кристаллов и свободных масок, припаянные с помощью торцевых контактов и ламелей к объединительной коммутационной плате.

1.8. Микро- и наноразмерные контактные соединения

В настоящее время наблюдается растущий интерес к применению в нанoeлектронике и фотонике наноструктур (наночастиц, нанотрубок, проволок) с функциональными электрическими характеристиками, которые собираются в наноразмерные приборы и схемы. Для создания наноразмерных приборов с высоким отношением поверхность/объем необходимо соединить отдельные структуры контактами с малым омическим сопротивлением. Однако создание электри-

ческого контакта между наноструктурами затруднено, поскольку вместо прямого омического контакта получается туннельное соединение с величиной сопротивления около 200 кОм [12]. Такое большое сопротивление интерпретируется с малым размером контактной площадки размером около 1 нм^2 . Достижение низкой величины сопротивления контакта возможно с применением процессов пайки, микросварки, соединения пастами, в которых используются проводящие материалы с большей контактной площадью.

Для выполнения микросоединений на молекулярном уровне в наноструктурах применяют энергию ускоренных потоков частиц: электронов или ионов в вакууме. В зависимости от материала подложки и характеристик наноструктуры в зоне контакта может наблюдаться трансформация кинетической энергии частиц в теплоту, излучение электронов, ионизацию и т.д. Для углеродных нанотрубок (рис. 1.20,а) основным механизмом трансформации кинетической энергии является смещение атомов в их структуре с образованием вакансий. Другим механизмом является миграция промежуточных частиц по поверхности при энергии 0,5–1,0 эВ и в свободные пространства между ячейками.

Для образования молекулярного соединения в наноструктурах микросваркой возможно использование электронного луча в просвечивающем электронном микроскопе при ускоряющем напряжении 1,25 МВ и температуре образца 800°C . Воздействие энергии электронного луча вызывает образование структурных дефектов, что приводит к образованию микросварного соединения между нанотрубками (рис. 1.20,б).

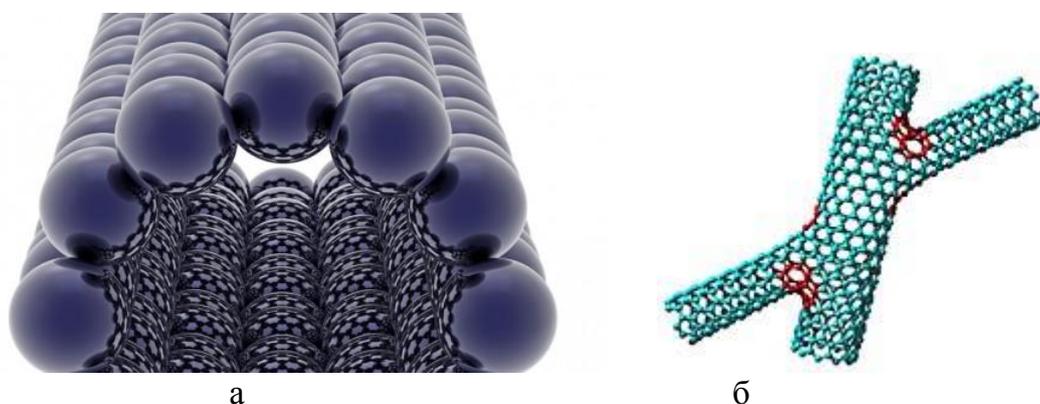


Рис. 1.20. Структура углеродных нанотрубок (а) и их соединение сваркой (б)

Для соединения наноматериалов различной геометрии в МЭМС и LIGA-компонентах применяют микро и наносварку электронным лучом. Формирование контактных наноразмерных соединений (50–90 нм) возможно с применением сканирующего электронного микроскопа. Электронный луч в РЭМ может быть сфокусирован до наноразмеров (50–125 нм) и под его воздействием плавится большинство материалов, таких как никель, алюминий, хромель и др. Амплитуда области сканирования определяется размерами микросварного соединения, которое формируется без пор и трещин (рис. 1.21).

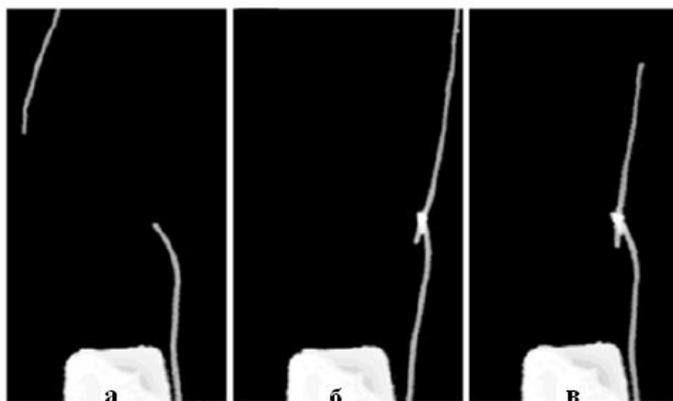


Рис. 1.21. Формирование сварного соединения нанотрубок электронным лучом: совмещение (а), сварка (б), обрыв не присоединенной трубки (в)

Применение наноструктурированных паяльных материалов, которые имеют не только геометрические размеры менее 100 нм, но и иные физические свойства, чем объемные материалы, создает новые возможности для технологии электромонтажных соединений. Использование наноразмерных паяльных паст позволяет снизить температуру плавления, что особенно важно для пайки бессвинцовыми припоями. Это позволяет снизить энергозатраты процесса монтажа. После плавления пасты и соединения отдельных наночастиц припой вновь приобретает свойства, характерные для материала большого объема. Для паяных соединений, полученных с помощью наноструктурированных материалов, отмечено значительное повышение ползучести [13].

Прогрессирующее повышение плотности межсоединений в электронных модулях при монтаже Flip Chip приводит к замене сравнительно больших бампов припоя на малые медные столбики, присоединяемые термокомпрессионной сваркой к контактным площадкам. Это создает определенные трудности при сборке и проблемы, связанные со снижением надежности межсоединений. Предложено выращивать на контактных площадках углеродные нанотрубки методом Catalytic Chemical Vapor Deposition (CCVD) [14], которые имеют диаметр 30 нм и длину от 10 до 30 нм. Совокупность тысяч нанотрубок образует кластер на контактной площадке (рис. 1.22), на который затем осаждается припой.

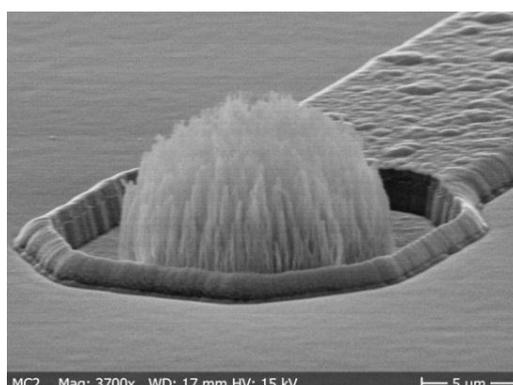


Рис.1.22. Кластер из нанотрубок на контактной площадке

Включенные в состав припоя углеродные нанотрубки снижают коэффициент линейного расширения припоя до двух раз, что повышает устойчивость паяных соединений к термоциклированию.

Список литературы к главе 1

1. Медведев А.М., Мылов Г. Будущее технологий электрических межсоединений в электронном приборостроении // Технологии в электронной промышленности.– 2012. – № 6.– С. 8–12.
2. Печатные платы: Справочник / Под ред. К.Ф. Кумбза. Книга 1. – М.: Техносфера, 2011.– 1016 с.
3. Медведев А.М. Сборка и монтаж электронных устройств.– М.: Техносфера, 2007. – 256 с.
4. Lee N.C. Reflow soldering processes and troubleshooting: SMT, BGA, CSP and flip chip technologies. Berlington, USA, 2002. – 270 p.
5. Нисан А. Восемь тенденций, которые изменят электронику // Технологии в электронной промышленности. – 2011. – № 2. – С. 4 –8.
6. Ланин В.Л., Достанко А.П., Телеш Е.В. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники. Минск: Издательский Центр БГУ, 2007.–574 с.
7. Смирнов В.И., Матта Ф.Ю. Теория конструкций контактов в электронной аппаратуре. – М.: Советское радио,1974. – 176 с.
8. Prasad R.P. Surface Mount Technology. Principles and Practice. 2-rd edit.– Norwell.: Kluwer Academic Publ.–1997.–772 p.
9. Lau G.H., Lee S.W.R. Chip Scale Package. Design, Materials, Process, Reliability, and Applications. N.Y.: McGraw-Hill, 1999. – 567 p.
10. Prasad S.K. Advanced Wirebond Interconnection Technology. – Norwell (USA), 2004. – 670 p.
11. Garrow F.E., Turlik I. Multichip Module Technology Handbook. – N.Y.: McGraw Hill, 1999. – 620 p.
12. Microjoining and Nanojoining / Edit by Y. Zhou. – N.Y.: CRC Press, 2008. – 785 p.
13. Новиков А. Применение наноструктурированных материалов в технологии соединений // Технологии в электронной промышленности.– 2012. – № 5. – С. 65–67.
14. Desmaris, V. Carbon Nanofibers (CNF) for enhanced solder-based nano-scale integration and on-chip interconnect solutions / V. Desmaris [and ets.] // Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 27-30 May 2014, Orlando, FL, USA.– P. 1071 – 1076.

ГЛАВА 2

ОСНОВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

2.1. Припой для электромонтажных соединений

Припои, предназначенные для горячего облуживания поверхностей и образования паяного соединения деталей при сборке и монтаже конструкций изделий электроники, должны удовлетворять следующим требованиям: высокая механическая прочность в заданных условиях эксплуатации, высокая электропроводность и теплопроводность, герметичность, стойкость против коррозии, жидкотекучесть при температуре пайки, хорошее смачивание основного металла, малая величина температурного интервала кристаллизации. По температуре плавления припои подразделяются на следующие группы (ГОСТ 19248-90): особолегкоплавкие $T_{пл} \leq 145^\circ\text{C}$, легкоплавкие $145^\circ\text{C} < T_{пл} \leq 450^\circ\text{C}$, среднеплавкие $450^\circ\text{C} < T_{пл} \leq 1100^\circ\text{C}$, высокоплавкие $T_{пл} > 1100^\circ\text{C}$. Прежнее деление (мягкие низкотемпературные припои $T_{пл} < 450^\circ\text{C}$ и высокотемпературные твердые) устарело. В электронике используются припои первых трех групп. Основную группу легкоплавких припоев составляют оловянно-свинцовые припои системы Sn–Pb (рис. 2.1).

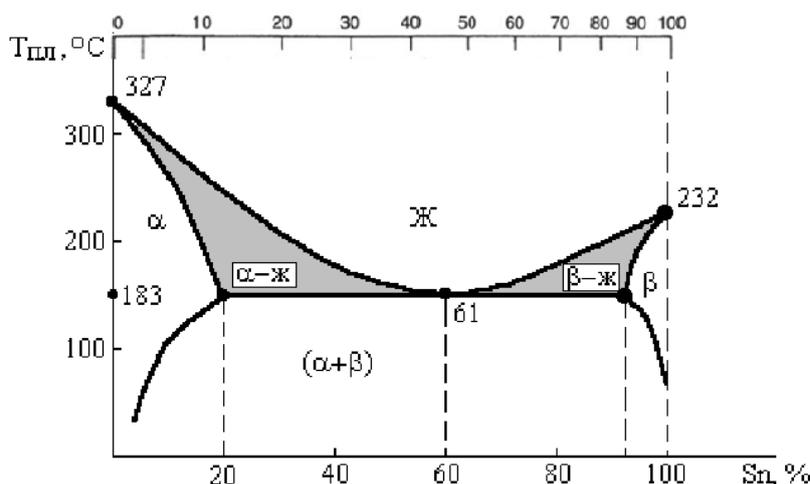


Рис. 2.1. Диаграмма состояния системы Sn–Pb

Наименьшей температурой плавления (183°C) обладает эвтектический сплав (61% Sn, 39% Pb). При концентрации Sn в расплаве от 0 до 20% образуется богатый свинцом α -твердый раствор, при 97,5% – богатый оловом β -твердый раствор. Выше линии ликвидуса в интервале концентраций Sn в расплаве от 20 до 60% образуется α -раствор, т.е. расплав содержит нерастворенные частицы свинца, при концентрации олова от 60 до 97,5% - β -раствор. Состав, температу-

ры плавления и области применения Sn–Pb припоев приведены в табл. 2.1. Недостатками припоев системы Sn–Pb является их разупрочнение и ползучесть при температурах выше 100–150°C. Припои ПОС 30, ПОС 40 имеют широкие температурные интервалы кристаллизации, что снижает производительность процессов пайки. Введением легирующих добавок в систему Sn–Pb получают припои, отличающиеся повышенной механической прочностью (Sb), пониженной температурой плавления (Bi, Cd, In), повышенной электропроводностью (Ag), пригодностью к УЗ пайке и металлизации (Zn), пайке полупроводниковых приборов (In, Au, Ga) (табл. 2.2).

Таблица 2.1. Свойства оловянно-свинцовых припоев

Марка припоя	Состав, % свинец - ост.	Температура плавления, °С	Область применения
ПОС 30	олово 29-30, сурьма 1,5-2,0	183-256	Конструкционная пайка меди и ее сплавов, углеродистых сталей
ПОС 40	олово 39-40, сурьма 1,5-2,0.	183-235	Пайка и лужение деталей из медных сплавов и сталей
ПОС 61	олово 59-61, сурьма до 0,8	183	Монтажная пайка, лужение выводов ЭРЭ и ИС
ПОС 61М	олово 59-61, сурьма до 0,8, медь 1,5-2,0.	183-185	Пайка паяльником монтажных соединений
ПОС 63	олово 63±0,5, примеси 0,15	183-185	Волновая пайка многослойных печатных плат
ПОС 90	олово 90	183-222	Пайка деталей по серебряным и золотым покрытиям

Выбор марки припоя определяется требуемой механической прочностью и электропроводностью соединений, максимально допустимой температурой пайки, типом основного металла и технологического покрытия, а также технико-экономическими и технологическими требованиями. Наиболее распространенным припоем для монтажной пайки является оловянно-свинцовый припой ПОС 61, который отличается низкой температурой плавления, узким интервалом кристаллизации, хорошей жидкотекучестью и низким электрическим сопротивлением. Эти факторы способствуют применению групповых методов пайки с высокой производительностью.

Обогащенный медью припой ПОС 61М предназначен, в основном, для ручной пайки, так как он замедляет эрозию паяльного жала. При монтаже штепсельных, высокочастотных и коаксиальных разъемов, кабелей, требующих повышенного нагрева, используют малооловянистые припои ПОС 40, ПОС 30. Пайку и лужение термочувствительных элементов ведут особолегкоплавкими припоями ПОСК 50, ПОСВ 50, ПОСВ 33. Пайку деталей с покрытиями, содер-

жащими серебро, золото, индий, палладий проводят припоями, в состав которых входят эти элементы.

Таблица 2.2. Свойства специальных припоев

Марка припоя	Состав, % свинец - ост.	Температура плавания, °С	Область применения
ПОССу 10-2	олово 8-10, сурьма 2-3	268-285	Пайка соединений с повышенной прочностью
ПОСК 50-18	олово 50, кадмий 18	142-145	Пайка элементов, чувствительных к перегреву
ПОСВ 33	олово 33, висмут 33	120-130	Лужение печатных плат
ПОСВ 50 (сплав Розе)	олово 25, висмут 50	90-92	Лужение ПП и МПП
ПОСВ 50К (сплав Вуда)	олово 12,5, кадмий 12,5, висмут 50	66-70	Пайка предохранителей
ПОИ _н 50	олово 50, индий 50	117	Пайка подложек ГИС, БГИС, феррита, керамики
ПСр 45	серебро 45, медь 30, цинк 25	660-725	Пайка изделий из меди и стали при повышенных статических и вибрационных нагрузках
ПСр 2,5	олово 5, серебро 2,5	295-305	Пайка волноводов с серебряным покрытием
ПСр 1,5	олово 15, серебро 1,5	265-270	Пайка соединений, работающих при температуре до 200°С
ПОССр 2	олово 60, серебро 2	169-173	Пайка и лужение по серебряным покрытиям
П150А	олово 40, цинк 3,5	150-165	Пайка и лужение керамики и ферритов с ультразвуком
ПОЦ 10 (П200А)	олово 90, цинк 10	199-210	Пайка и лужение керамики с ультразвуком
ПОЦ 20 (П250А)	олово 80, цинк 20	200-250	Пайка алюминиевых, титановых сплавов с ультразвуком
П300А	кадмий 40, цинк 60	266-310	Пайка алюминиевых, титановых сплавов с ультразвуком
ПОС 3л3	олово 60, золото 3.0	180-215	Пайка полупроводниковых приборов
ПГлМ 65	галлий 65, медь 34-36	50	Пайка термочувствительных элементов с самоупрочнением соединений

Припой на основе олова (ПОС 61) получили широкое распространение в технологии пайки благодаря хорошему смачиванию некоторых металлов (меди, никеля, золота, серебра) и невысокой температуре пайки (190–250 °С).

2.2. Свойства припоев в зависимости от состава и наличия примесей

Существенным недостатком оловянно-свинцовых припоев является их активное физико-химическое взаимодействие как в расплавленном состоянии, так и в твердой фазе с рядом металлов (Au, Ag, Pd, Pt, Cu, Ni), применяемых как в компактном виде (пластинки, проволочки) так и в виде тонких покрытий толщиной от 1 до 10 мкм. Продукты взаимодействия припоев с этими металлами, т.е. интерметаллические соединения (особенно в виде сплошной прослойки толщиной более 3–5 мкм), могут значительно снизить прочность межсоединений [1].

Низкие скорости растворения металлических проволочек в расплаве припоя системы Sn–Pb 0,043; 1,56; 0,021; 0,356 мкм/с имеют Ni, Pt, Pd при температуре 371 °С соответственно. Скорость растворения меди оставляет 1,56 мкм/с. Припой с малым содержанием олова в меньшей степени растворяют медь (0,0457 мкм/с). Добавка в эвтектический припой Pb–Sn меди (0,75–2,3%) также уменьшает скорость растворения меди. Поэтому для пайки медных покрытий рекомендуют использовать как припой с малым содержанием олова, так и эвтектический припой, модифицированный медью. Но следует учитывать, что при быстром перемещении жидкого припоя относительно паяемого материала скорость растворения может превышать вышеуказанные скорости в несколько раз. При пайке соединений припоем ПОС-61 покрытия из Ni, Pt, Pd или их сплавов (Ni–Pd, Ni–Pt) могут применяться как барьерные [2].

В двухслойной контактной системе Au–Sn, полученной путем конденсации молекулярных пучков в вакууме, наблюдается взаимная диффузия в твердой фазе компонентов системы при комнатной температуре. За 48 ч двухслойная пленочная система (толщины пленок Au и Sn 1,7 и 3,0 мкм соответственно) превращалась при температуре 20 °С в пленку однородного состава, соответствующего фазе AuSn. Этот факт свидетельствует о химической несовместимости золота с оловом в неразъемных соединениях.

Другим недостатком припоев на основе олова и индия является то, что тепловое расширение олова и индия, имеющих тетрагональную кристаллическую структуру, крайне анизотропно: ТКЛР вдоль главной оси кристалла примерно в 2 раза больше ТКЛР в направлении, перпендикулярном главной оси. Механические напряжения, обусловленные анизотропией ТКЛР зерен олова и изменением температуры, довольно велики. При термоциклировании припоев ПОС 61 и ПОС 61М, содержащего медь (1–4%) нагревом до 160 °С и охлаждением до 20 °С в течение 30 с по истечении 4 000–5 000 циклов предел прочности на растяжение припоя ПОС-61 снижается в 2,5–3,0 раза [3]. Усталостные явления в припое развиваются быстрее при наличии в нем меди, а стойкость к термоциклированию падает с увеличением концентрации меди.

Источниками примесей в расплавах припоев могут быть материалы выводов электронных компонентов и печатных плат, эрозия ванны или тигля, смешивание припоев различных составов. Максимальные значения содержания примесей определены в стандарте IPC j-STD-006 (табл. 2.3).

Таблица 2.3. Максимальные значения содержания примесей в Sn-Pb припоях

Примесь	Максимальное содержание, %
Сурьма	0,5
Медь	0,3
Висмут	0,25
Золото	0,2
Серебро	0,1
Мышьяк	0,03
Железо	0,02
Никель	0,01
Алюминий	0,006
Цинк	0,005
Кадмий	0,005
Общее содержание Cu, Au, Cd, Zn и Al	0,4

При термоциклировании образование усталостных трещин начинается на периферии паяного шва, т.е. вблизи границы раздела припоя с подложкой ИС и проволочным выводом. Усталостные повреждения возникали на границах раздела фаз, богатых оловом и свинцом, и трещины развивались в основном вдоль этой границы. Эвтектический сплав Sn-Pb имеет большую склонность к зарождению усталостных микротрещин. Большая пластическая деформация паяного шва происходила в высокотемпературной части термического цикла (100–140°C), а при низкой температуре (-50°C) припой более прочные и поэтому могут выдерживать большие в 2 раза напряжения.

Для повышения усталостной прочности укрепляют границы зерен припоев на основе олова дисперсными частицами интерметаллидов типа Ni_3Sn , а также припой армируют частицами никеля, железа, кобальта размером 40–100 мкм в количестве 5–15 вес.% [4]. Эффективность упрочняющего действия частиц второй фазы, стабильных с металлической матрицей, определяется геометрическими параметрами структуры. Максимальный эффект достигается при выполнении следующих условий: размер упрочняющих частиц не должен превышать 0,01–0,05 мкм; среднее расстояние между упрочняющими частицами должно составлять 0,1–0,5 мкм при равномерном их распределении в матрице; количество упрочняющей фазы должно быть не более 5–10 %. Поэтому крупные частицы из никеля и железа, образующих с оловом твердые растворы и химические соединения, не могут быть упрочняющей фазой для олова и припоев на его основе. Эффективными упрочнителями могут служить высокодисперсные частицы дву-

окиси титана или вольфрама, которые химически стабильны в контакте с оловянной матрицей дисперсно-упрочненного припоя.

При эксплуатации приборов с соединениями, паяными припоями на основе олова, в условиях резких термических воздействий, особенно при минусовых температурах окружающей среды, появляется опасность разрушения таких деталей приборов, как ферритовые, керамические подложки ГИС, кремневые и германиевые кристаллы полупроводниковых устройств. Потеря пластичности оловянных припоев при низких температурах снижает стойкость паяных соединений к термическим ударам.

Припой на основе сплавов олова с индием применяются для пайки термочувствительных изделий, предельно допустимая температура которых не превышает 150—250°C. Недостатками припоев с высоким содержанием индия является низкая температура плавления (120—156°C), низкая прочность индия, анизотропия теплового расширения и повышенная химическая активность к большинству металлов.

Припой выпускают в виде литой (а) или прессованной проволоки (б), в которой зерна припоя окружены канифолью, при общем ее содержании 0,8-2,2 мас. процента, а также заполненной флюсом одно (в), трех (г) или пятиканальной трубки (рис. 2.2). Применение трубчатого припоя при ручной пайке сокращает на 30-40% расход припоя из-за оптимального дозирования. Трубчатые припои серии Crystal компании Multicore Solders на основе сплавов Sn60 и Sn62 и содержанием флюса до 3% оставляют минимальное количество остатков на плате и не требуют отмывки.

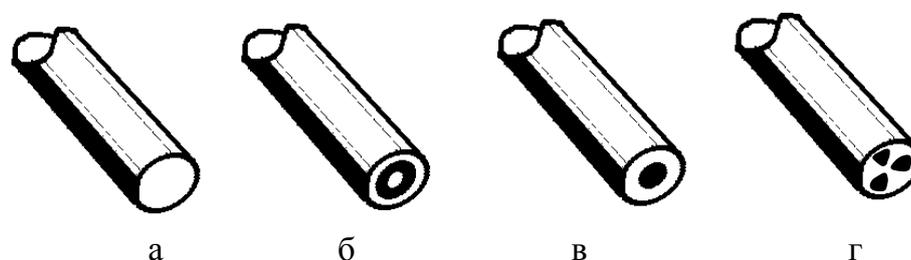


Рис. 2.2. Структура трубчатых припоев

2.3. Бессвинцовые припой

Замена традиционных типов припоев на материалы, не содержащие свинца, является не только веянием времени, но и требованием международных комиссий по экологии. Директива Европейского Союза по экологической безопасности RoHS (Restriction of Use of Certain Hazardous Substances) с 1 июля 2006 года ограничила использование свинца в новом электрическом и электронном оборудовании — не более 0,01%.

Среди термических, механических, усталостных и других свойств припоев одним из самых важных является температура плавления. В табл. 2.4 представлены некоторые из широко известных типов бессвинцовых припоев [5]. Бес-

свинцовым припоям с высоким содержанием индия свойственна несовместимость материалов индия и свинца, независимо от того, присутствует ли последний на поверхности печатной платы или на выводах компонентов. Для реализации полностью бессвинцового процесса в некоторых случаях необходимо задействовать бессвинцовое покрытие паяемых поверхностей печатного монтажа и выводов компонентов. Бессвинцовые припои характеризуются либо слишком низкой, либо слишком высокой температурой плавления по сравнению с эвтектическими свинцово-оловянными припоями. При использовании низкотемпературных припоев необходим специальный флюс, поскольку спиртоканифольных флюсов при низких температурах малоактивен. Ещё одним ограничением, связанным с низкотемпературными припоями, является уменьшение их смачивающих свойств, вызванное повышенной текучестью при субэвтектических температурах.

Таблица 2.4. Бессвинцовые припои и их свойства

Состав припоя	Тпл, °С	Свойства
48 Sn–52 In	118	Низкие температура плавления и прочность, высокая стоимость
Sn-57,6 Bi-0,4 Ag	137,4	Легкоплавкость, высокая стоимость
42 Sn–58 Bi	138	Легкоплавкость, высокая стоимость
91 Sn–9 Zn	199	Высокая степень шлакообразования
91 Sn–8 Zn–3Bi	187–197	Легкоплавкость
SAC Sn3,9Ag0,6Cu	217	Эвтектика. Широко применяемый припой вместо Sn–Pb
93,5 Sn–3 Sb–2 Bi–1,5 Cu	218	Высокая прочность
95,5 Sn–3,5 Ag–1 Zn	218–221	Высокая прочность и устойчивость к термической усталости
99,3 Sn–0,7 Cu	227	Эвтектика. Высокая прочность и высокая температура плавления
95 Sn–5 Sb	232-240	Высокое сопротивление сдвигу, термоустойчивость
65 Sn–2,5Ag–10 Sb	233	Высокая температура плавления
97Sn–2Cu–0,8 Sb–0,2 Ag	226-228	Высокая температура плавления
96,5 Sn–3,5 Ag	221	Эвтектика. Высокая прочность
ПОМ 3 Sn3-3,5Cu	230–250	ТУ 173-369-031-2002
ПОМЦ-3 Sn–16-18Cu-2-3Zn	210–400	Оловянно-марганцевый припой с высокой температурой ликвидуса, широкий интервал кристаллизации

Для низкотемпературных применений определенное признание получили припои, содержащие индий. Так, многими компаниями используется припой, содержащий 52% In и 48% Sn, поскольку он обеспечивает лучшие характеристики

ки при повторной пайке в процессе ремонта или переделки. Поскольку температура плавления этого припоя составляет 118°C , повторная пайка при более низкой температуре может производиться многократно без риска теплового повреждения. Если платы покрыты золотом в качестве антиоксиданта, то использование припоя с индием предотвращает выщелачивание золота. Бессвинцовым припоем с температурой плавления 138°C является сплав 42 Sn/58 Bi, однако висмутсодержащие сплавы обычно имеют плохие характеристики смачивания.

Другие сплавы, представленные в табл. 2.4, обладают более высокой температурой плавления, чем свинцово-оловянный эвтектический сплав с температурой плавления 183°C . Это, например, оловянно-цинковый бессвинцовый припой с температурой плавления 199°C . Такие припои несовместимы с широко распространёнными материалами для изготовления печатных плат, такими как FR-4. Помимо этого, более высокие температуры при повторной пайке могут увеличить риск повреждения платы, поскольку для повторной пайки требуется температура жала паяльника 400°C . Для некоторых применений эта температура слишком высока и вызвать тепловое повреждение.

Одной из ключевых проблем использования бессвинцовых припоев с повышенной температурой при пайке волной является повышение риска пробоя конденсаторов. При пайке волной следует поддерживать температуру в диапазоне $230\text{--}245^{\circ}\text{C}$, что на $45\text{--}65^{\circ}\text{C}$ выше температуры плавления оловянно-свинцового припоя. Бессвинцовый припой с температурой плавления 220°C потребует при пайке волной температуры $265\text{--}280^{\circ}\text{C}$. Это увеличивает разницу температур между предварительным нагревом и пайкой волной и, соответственно, повышает риск повреждения конденсаторов.

В целом, почти все бессвинцовые припои имеют меньшую смачиваемость, чем эвтектические оловянно-свинцовые, и потому первые из них хуже заполняют необходимую площадь. Для улучшения текучести требуются специальные составы флюсов. Усталостные характеристики бессвинцовых припоев также недостаточно хороши, хотя не наблюдалось нарушения целостности паяного соединения после испытания термическим циклом для припоя 96,5 Sn–3,5 Ag.

В идеале температура плавления припоя должна составлять около 180°C , так чтобы для оплавления использовалась температура $210\text{--}230^{\circ}\text{C}$; для пайки волной – $235\text{--}245^{\circ}\text{C}$, а для ручной пайки – $345\text{--}400^{\circ}\text{C}$. Более высокие температуры ручной пайки могут использовать только высококвалифицированные монтажники во избежание теплового повреждения электронных компонентов. Очевидно, что олово и в будущем останется основным компонентом припоя монтажной пайки. Сплавы SnAgCu рассматриваются как наиболее перспективные. Наиболее лидирующие припои на их основе следующие: в США – Sn_{3,9}Ag_{0,6}Cu (рекомендован NEMI — National Electronic Manufacturing Industry); в Европе – Sn_{3,8}Ag_{0,7}Cu (рекомендован Европейским Консорциумом Brite/EuRam); в Японии – Sn_{3,0}Ag_{0,5}Cu (рекомендован Japanese Electronic Industry Development Association).

На испытаниях SnAgCu проявляет функциональную эквивалентность эвтектическому сплаву Sn–Pb–Ag. Однако SnAgCu плавится при 217°C , что на

34°C больше, чем Sn–Pb. Печатные платы, компоненты, флюсы, подверженные высоким температурам пайки, испытывают большие термодинамические воздействия, которые могут провоцировать разрушения, дефекты и снижать надежность межсоединений. Динамику этих процессов можно оценить по ускорению процессов термической деструкции. С увеличением температуры на каждые 8°C количество дефектов будет увеличиваться в два раза [6].

В бессвинцовых припоях медь, как материал печатных плат, растворяется быстрее из-за более высокой температуры пайки, более высокого содержания Sn в припое и присутствия Ag. Повышение уровня содержания меди в расплаве припоя свыше 0,5% приводит к увеличению температуры ликвидуса расплава и в результате к возможности появления таких дефектов соединений, как перемычки, “иголки” и др. Для бессвинцовых припоев увеличивается эрозия материала ванны пайки. Железо, входящее в состав различных деталей, при растворении в расплаве образует игольчатые кристаллы FeSn_2 , которые могут осесть на плате между токоведущими дорожками и вызвать короткое замыкание [7]. Изготовление ванны для пайки из титана позволяет устранить эту опасность.

Замена свинецсодержащих припоев бессвинцовыми сплавами вызвала целый ряд проблем в области металловедения припоев. Надежность и механические свойства паяных соединений сильно зависят от микроструктуры припоя, морфологии и толщины интерметаллических соединений на межфазной границе. Образование пластинчатых интерметаллидов Ag_3Sn (рис. 2.3) оказывает негативное воздействие на усталостные процессы, вызывает образование трещин и их распространение на межфазной границе Ag_3Sn /припой [8].

Применение УЗ колебаний при кристаллизации припоя позволяет в определенной степени решить эти проблемы. Главными эффектами воздействия кавитации и микропотоков на жидкие металлы являются ускорение первичного образования ядер, инициация вторичного зародышеобразования центров кристаллизации вследствие физического перемешивания и ускорения диффузии. С помощью оптической микроскопии установлено, что после УЗ обработки в течение 240 с на частоте 40 кГц толщина интерметаллического слоя Cu_6Sn_5 на границе Cu/SAC уменьшилась на 76% и не превышала 2 мкм, ширина β -Sn дендритов – на 67%, а образование интерметаллида Ag_3Sn предотвращено. Для УЗ модификации сплавов характерны такие эффекты, как измельчение зерна, улучшение однородности структуры [9], смачивающей способности и механических свойств паяных соединений, выполненных бессвинцовыми припоями [10].

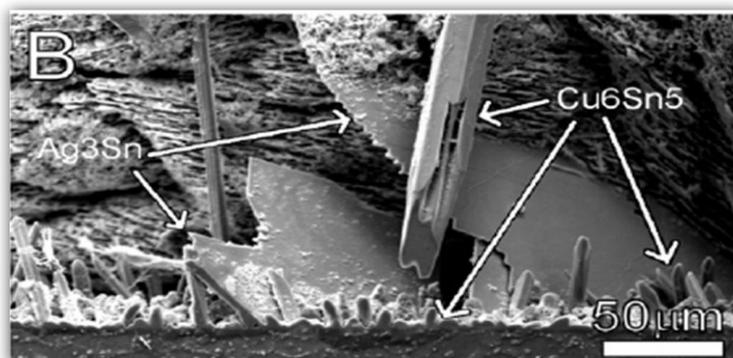


Рис. 2.3. Пластичные интерметаллиды Ag_3Sn на межфазной границе

Применение бессвинцовых припоев в процессах пайки электронных модулей создало проблему совместимости пайки компонентов, в том числе применительно к корпусам типа BGA, CSP с шариковыми выводами, состоящими из бессвинцового припоя, обычными оловянно-свинцовыми припоями. В процессе отработки режимов выполнения технологических операций автоматизированной сборки и монтажа опытных образцов типовых представителей электронных модулей установлено, что бессвинцовые покрытия выводов компонентов, в том числе Sn_{100} , $\text{Sn}_{97}\text{Bi}_3$, $\text{Sn}_{98}\text{Cu}_2$, NiAu полностью совместимы с оловянно-свинцовым припоем – они хорошо смачиваются припоем и образуют высококачественные паяные соединения при условии полной оптимизации параметров дозированного нанесения припойной пасты и температурно-временных режимов пайки. Качество паяных соединений, выполненных с применением оловянно-свинцовых припоев, оказалось выше качества бессвинцовых ПС, то есть применение компонентов с бессвинцовым покрытием выводов при истекшем сроке сохранения паяемости, возможно по традиционной технологии монтажа [11].

Металлографические исследования шлифов ПС, образованных оловянно-свинцовым припоем между облуженными припоем ПОС-61 контактными площадками печатной платы и выводами поверхностно-монтируемых компонентов (микросхем в корпусах типа SOIC, TSSOP, TSOP, QFP и др.) с покрытиями Sn_{100} (бессвинцовое) и $\text{Sn}_{85}\text{Pb}_{15}$ (свинцоводержащее) показали практически идентичные микроструктуры паяных соединений (рис. 2.4).

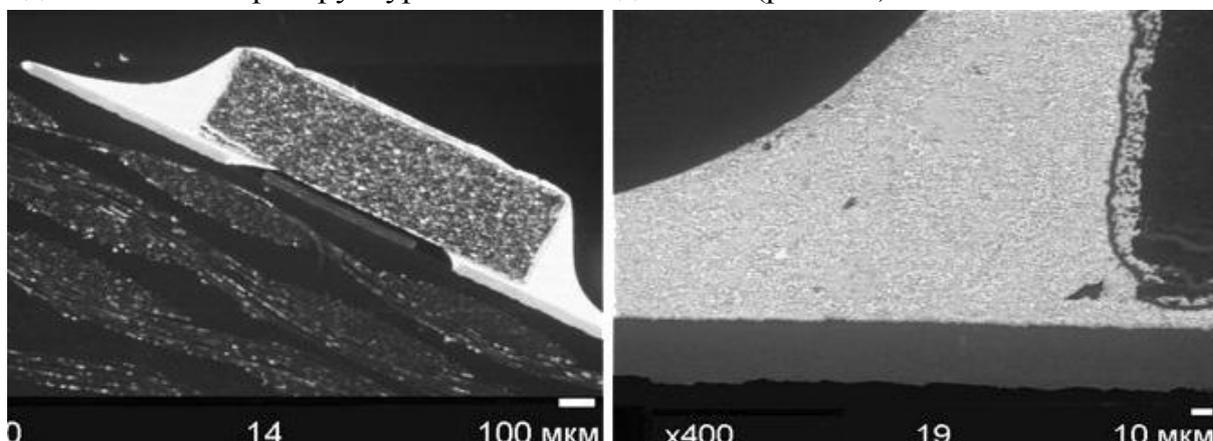


Рис.2.4. Металлографические шлифы паяного соединения вывода чип-резистора 0402 с покрытием Sn85Pb15, образованного с применением припоя Sn62Pb36Ag2

В паяном соединении формируются тонкие слои односторонних интерметаллидов (SnCu_3 , Sn_5Cu_6) на границах с медной контактной площадкой платы и с основным металлом вывода компонента, между которыми располагается мелкозернистая структура твердого раствора околорезектического оловянно-свинцового припоя толщиной 60–100 мкм без посторонних включений.

2.4. Флюсы для электромонтажной пайки

Для успешного проведения операции пайки применяют флюсы, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

- иметь температуру плавления ниже температуры плавления припоя;
- полностью растворять окислы основного металла, но не образовывать с ним трудноудаляемых химических соединений;
- остатки флюса должны легко удаляться с поверхности основного металла после пайки и не вызывать коррозии паяного соединения;
- флюс и продукты его разложения при выполнении пайки не должны выделять удушливых или вредных газов, т.е. флюс должен быть термически стабилен в заданном интервале температур.

В зависимости от температурного интервала активности флюсы подразделяются на низко- и высокотемпературные. Основные параметры флюсов: химическая активность, термическая стабильность, температурный интервал флюсования $\Delta T_{\text{ф}} = (T_{\text{А}} - T_{\text{пф}})$, где $T_{\text{А}}$ – температура активации, $T_{\text{пф}}$ – температура потери флюсоющих свойств, коэффициентом растекания припоя ($K_{\text{р}}$). Основные типы флюсов приведены в табл. 2.5.

Смолосодержащие флюсы на основе канифоли имеют органическое происхождение. С химической точки зрения канифоль является нелетучей фракцией смолистых веществ хвойных деревьев, в ее состав входят кислоты: абиетиновая и пимаровая, которые при температуре 225–300°C растворяют тонкие оксидные пленки на меди и олове. Достоинством флюсов на основе канифоли является нетоксичность, отсутствие коррозионного действия, длительная сохраняемость. Недостатки: малая активность, трудность удаления смолистых остатков, пары канифоли необходимо удалять местной вытяжной вентиляцией.

Для повышения активности флюсов в их состав вводят активирующие добавки (активаторы), которыми являются: анилин $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$, гидразин, триэтанолламин $\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_3$, солянокислый диэтиламин $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{NHCl}$, а также органические кислоты: салициловая, адипиновая, щавелевая, лимонная, молочная и др. При введении активаторов стремятся к тому, чтобы в температурном интервале пайки добавки со щелочными свойствами (триэтанолламин) нейтрализовали остатки веществ, имеющих кислотные свойства (салициловая кислота, солянокислый диэтиламин и др.). Смолосодержащие флюсы удаляются трехкратной про-

мывкой в смеси (1:1) бензина и этилового спирта при 20°C или УЗ обработкой. Водорастворимые флюсы удаляются струйной промывкой в горячей проточной воде с последующей протиркой щетками.

Для сокращения выброса легколетучих органических компонентов с 90% до 1% для волной пайки применяют флюсы MF220 и MF300 на водной основе с содержанием твердых веществ $4,6 \pm 0,2$ %, классификацией по IPC-SF-818 как ORMО, кислотным числом $37 \pm 2,5$ мг КОН/г. Флюса наносят распылением, увеличивают температуру предварительного нагрева до 110–120°C, что снижает термоудар на плату на 20–30°C и улучшает смачивание припоем. Количество дефектов при волновой пайке бессвинцовыми припоями с флюсами на водной основе сокращается в 2,5 раза [12].

Таблица 2.5. Состав и свойства флюсов для монтажной пайки

Марка флюса	Химический состав, %	Кр при 260°С	Область применения
ФКСп	Канифоль сосновая 10-40, Спирт этиловый - ост.	1,0	Некоррозионный смолосодержащий флюс для пайки и лужения
ФКТ	Канифоль сосновая 10-40, Тетрабромид-дипентен 0,1 Спирт этиловый – ост.	1,2	$\Delta T_{\phi} = 200-300^{\circ}\text{C}$
ФКТС	Канифоль сосновая 15-30, Салициловая кислота 3-3,5, Триэтаноламин 1-1,5 Спирт этиловый - ост.	1,2	Смолосодержащий флюс для монтажной пайки при условии полного удаления остатков
ЛТИ 120	Канифоль сосновая 20-25, Диэтиламин солянокислый 5, Триэтаноламин 1-2, Спирт этиловый - ост.	2,0	Пайка и лужение с полным удалением остатков
ФТБ	Бензойная кислота 4-4,5, Триэтаноламин 1-1,5 Спирт этиловый - ост.	1,1	Водорастворимый флюс для механизированной пайки
ФТС	Кислота салициловая 4-4,5, Триэтаноламин 1-1,5 Спирт этил. - ост.	1,2	Пайка печатных и многослойных плат $\Delta T_{\phi} = 225-325^{\circ}\text{C}$
ФГСп	Гидразин солянокислый 4, Глицерин 25-30, Спирт этиловый - ост.	1,5	Пайка и лужение деталей бытовых изделий
ФСкПс	Семикарбазид гидрохлорид 3-5, Полиокс- 100 27-37, Глицерин - ост.	1,8	Лужение печатных плат и выводов элементов с удалением остатков флюса

Создан специальный класс флюсов, не требующих отмывки (No Clean), которые имеют низкое количество твердых веществ (до 5%) и не содержат галогенов, что позволяет применить влагозащитное покрытие после пайки без удаления остатков флюса. К таким флюсам относятся: R41-01i, X32-10i, X33, MF200 и другие компании Multicore Solders. Флюс MF200 специально разработан для пайки припоями, не содержащими свинец, и позволяет обеспечить высокое качество паяных соединений без образования шариков припоя.

2.5. Припойные пасты

Технология поверхностного монтажа вызвала широкое применение припойных или паяльных паст, представляющих собой механическую смесь порошка припоя, связующего вещества, флюса и некоторых других компонентов. В настоящее время это один из наиболее перспективных, удобных и гибких способов дозирования паяльных материалов в условиях автоматического производства.

Припойная паста обеспечивает значительную (до 30–50%) экономию припоя благодаря точному дозированию, а клеящие свойства позволяют использовать пасты для фиксации элементов перед пайкой. Основным компонентом пасты является порошок припоя (75–95 мас. %), в виде сферических частиц диаметром 10–150 мкм, получаемых УЗ распылением жидкого припоя. В качестве связующих веществ используют органические смолы или их смеси. Кроме них в пасту вводят разбавители, пластификаторы, тиксотропные вещества. Последние препятствуют оседанию частиц припоя при хранении, повышают разрешающую способность пасты, обеспечивают заданный диапазон вязкости.

Для распыления припоя применяют УЗ установки на магнитострикционных или пьезоэлектрических преобразователях (рис. 2.5). Заготовка в виде прутка припоя подается в зону плавления высокочастотного индуктора, а затем капли припоя попадают на колеблющийся волновод и распыляются в защитной среде. Распыление происходит в среде азота с производительностью до 1 кг/час. Внешний вид УЗ установки для получения мелкодисперсных порошков низкотемпературных припоев приведен на рис. 2.6. В установках получают порошки припоев ПОС 61, ПОИп-52, ПОСК 50-18 с размером сферических частиц 10–160 мкм, в которых содержание кислорода по массе из за распыления в среде инертного газа не превышает $5 \cdot 10^{-2} \%$.

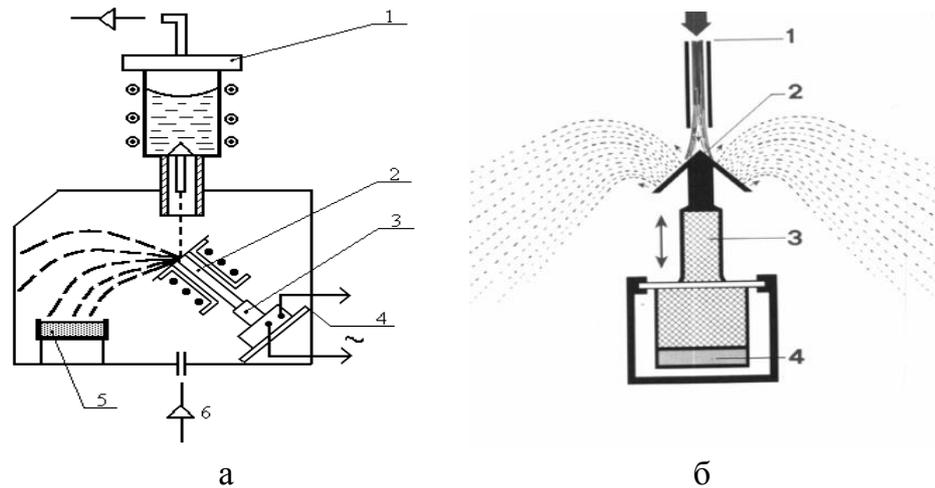


Рис. 2.5. Схемы УЗ распыления припоя: односторонняя (а) и двухсторонняя (б),
1 – расплав, 2 – резонатор, 3 – волновод, 4 – преобразователь, 5 – тара,
б – подача газа



Рис. 2.6. УЗ установка получения порошка припоя

Для объяснения механизма акустического распыления расплава принята капиллярно-волновая теория, согласно которой отрыв капелек жидкости происходит от гребней стоячих капиллярных волн на поверхности слоя жидкости. Длина параметрически возбуждаемых капиллярных волн определяется выражением [13]:

$$\lambda_k = \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho \cdot f^2}}, \quad (2.1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения припоя, ρ – плотность припоя, f – частота УЗ колебаний.

Дисперсность распыляемых частиц обычно находится в пределах $(0,3 - 3,0) \lambda_k$, тогда размеры распыляемых частиц определяются выражением:

$$d = (0,3 - 3,0) \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho \cdot f^2}}. \quad (2.2)$$

Припойные пасты представляют собой механическую смесь порошка припоя, связующего вещества (или связки), флюса и некоторых других компонентов. Дисперсность частиц припоя в пасте составляет 20–40 мкм, вязкость по пределу растекаемости 13–23 мм, время оплавления 3–5 с. Пасту можно нанести ровным, точно заданным слоем трафаретной печатью.

К припойным пастам предъявляют ряд требований. Они не должны окисляться, сильно и быстро расслаиваться, должны долго сохранять свои реологические свойства (т.е. способность к вязкому течению и деформациям), не растекаться далеко за пределы первоначально нанесенной дозы, не оставлять твердых и трудно удалимых остатков после пайки, обладать клеящими свойствами, не разбрызгиваться при воздействии концентрированных источников энергии, не ухудшать электрических характеристик печатной платы, отмываться в стандартных растворителях, наноситься на поверхность нужным способом, не быть чрезмерно дорогими и т. д. Припойные пасты отличаются типом припоя, составом флюса и свойствами (табл. 2.5).

Производство припойных паст во всем мире резко возросло за последнее десятилетие, поскольку это один из наиболее перспективных, удобных и гибких способов дозирования паяльных материалов в условиях автоматизации. Припойные пасты выпускают фирмы Du Pont, ЕМКА, Alpha Metals, Anjard Paste Technology, EFD (США), Heraeus (Германия), Multicore (Англия) и др. Промышленность стран СНГ выпускает припойные пасты марок ПЛ1-1, ПЛ1-3, ПЛ-112, ПЛ-212, ПЛ-312, ППЛ-ОС-61, ПП1-180, ПП-250.

Таблица 2.5. Свойства припойных паст

Марка пасты	Тип припоя	Флюсы	Температурный интервал, °С
ПП1-180	ПОС 61	Активированная канифоль	190–230
ПП1-180 Ср	ПсрОС3-58	– “ –	190–230
ПП-140	ПОСК 50-18	– “ –	140–155
ПП–250	ПСОВиСу	– “ –	260–290
SC 3301 Heraeus	Sn - 63%, Pb - 37%	Производные органических кислот	210–235
SC 6004 Heraeus	Sn - 48%, In - 52%	– “ –	140–170
96 SC Multicore	Sn -99,5, Ag 3,8, Cu 0,7	RP 15	240–260
RM89, RP15 Multicore	Sn – 62 Pb - 37% Ag - 2%	ROLO не требующий отмывки	210–235

Припойная паста обеспечивает значительную, до 30–50 % экономию припоя благодаря точному дозированию. Клеящие свойства паст позволяют использовать их для фиксации элементов перед пайкой. Припойные пасты характеризуются растекаемостью в исходном состоянии, расслаиваемостью (седиментация) - оседание порошка припоя в пасте при хранении, растекаемостью во время пайки, смачиванием паяемого металла, которое нужно учитывать при разработке процесса пайки.

Основным компонентом припойной пасты является порошок припоя, его может быть 75–95 мас.%. Размер и форма частиц порошка оказывают сильное влияние на реологические свойства пасты. Так, присутствие в пасте крупных частиц ухудшает свойства пасты. При большом числе мелких частиц они заполняют пространство между крупными частицами и ухудшают текучесть пасты. Кроме того, мелкие частицы имеют относительно большую площадь поверхности, что увеличивает скорость их окисления. Наилучшие результаты получаются при использовании частиц диаметром 10–150 мкм.

Форма частиц определяет во многом способность пасты дозироваться тем или иным способом. Частицы припоя сферической формы придают пасте способность к легкому продавливанию через узкие отверстия сетки или дозатора.

Паяемость припойной пасты в значительной степени зависит от степени окисления и загрязненности поверхности частиц порошка припоя. По зарубежным стандартам припой не должен содержать более 0,5% кислорода. Но важно не объемное содержание кислорода, а количество его в тонком приповерхностном слое, реагирующем в самом начале процесса пайки с флюсом и основным металлом. Отрицательное влияние на свойства пасты оказывает также углерод, который по некоторым предположениям попадает на поверхность частиц порошка из тары и упаковки в процессе хранения и транспортировки. Поэтому на всех этапах, начиная от изготовления порошка и кончая пайкой, необходимо принимать все меры против взаимодействия частиц с кислородом и углеродом. Вводимый в припойную пасту флюс играет ту же роль, что и при пайке компактным припоем. Обычно в пасту вводят те же флюсы, которые используют и при обычной пайке.

Основные физико-химические свойства припойных паст создаются благодаря введению в порошок припоя 4–15% связующих веществ. Именно они (иногда с добавлением растворителя) придают пасте нужную консистенцию, препятствуют расслоению и растеканию припойной пасты, повышают ее разрешающую способность, придают клеящие свойства, адгезию к подложке и т.п. Связующее вещество нейтрально по отношению к припою в ходе хранения и пайки, а при нагреве и пайке улетучивается или расплавляется без образования трудно удалимых твердых остатков. В качестве образующих веществ используют органические смолы или их смеси, разбавители и другие вещества. К ним добавляют растворители, пластификаторы, тиксотропные вещества, которые препятствуют оседанию частиц порошка припоя во время хранения, повышают разрешающую способность пасты, обеспечивают заданную вязкость.

Для достижения максимального срока жизни паста должна храниться в холодильнике при 5–10°C, перед использованием паста должна быть тщательно перемешана. Эффективное перемешивание пасты в однородную массу без воздушных пузырьков происходит в устройствах подготовки пасты SPS– и SPS–2 фирмы Malcom (рис. 2.7,а), которые представляют собой центрифугу, содержащую вращающееся коромысло, к одному концу которого закреплен держатель банки с пастой, а к другому – автоматически регулируемый противовес. В процессе псевдо-планетарного движения держатель медленно вращается в направлении, противоположном вращению коромысла, что вызывает перемещение пасты внутри банки. За счет взаимного трения слоев пасты повышается ее температура и паяльная паста готова к использованию через 10–15 мин после извлечения из холодильника.



а



б

Рис. 2.7. Устройство подготовки пасты SPS–1(а) и вискозиметр PC–1TL (б)

Для поддержания устойчивого взвешенного состояния порошкообразного припоя в пасте и одновременно легкого продавливания через отверстия в трафарете или иглу дозатора ее вязкость должна быть в пределах 700–900 сП. Реальная вязкость пасты зависит не только от исходного состояния, но и от условий транспортирования, хранения и применения. Поэтому для обеспечения высокого качества паяных соединений необходима проверка вязкости пасты на входном контроле. Для измерения вязкости пасты применяют как ручные вискозиметры, измеряющие величину крутящего момента на валу цилиндра со шнековой насадкой при ее погружении в пасту, так и настольные приборы типа PC–1TL (рис. 2.7,б) с цифровой индикацией вязкости, скорости вращения шнека и температуры пасты.

2.6. Токопроводящие клеи

Токопроводящие клеи получили широкое распространение при сборке приборов, что объясняется рядом преимуществ клеевых соединений. Склеивани-

ем соединяют разнородные материалы, включая тугоплавкие и хрупкие, электропроводные и диэлектрики. Свойства и структура материалов не изменяются, швы – герметичные с равномерно распределенными напряжениями, а механические напряжения намного меньше напряжений, чем при пайке. Технология склеивания проста, не трудоемка и производительна вследствие автоматизации. К недостаткам клеевых соединений следует отнести низкую стойкость при повышенных температурах, пониженную прочность при неравномерном отрыве, необходимость применения давления, дефицитность, а также токсичность составляющих клеевых композиций, газовыделение. Другим недостатком является выделение различных соединений и влаги. Так сорбция влаги клеевыми материалами приводит к увеличению абсолютной влажности в корпусах приборов при повышенных температурах, поэтому их выбор должен осуществляться с учетом температурной зависимости влажностных характеристик. Выделения клеевых материалов оказывают влияние на содержание влаги в герметичных корпусах, качество микросварных соединений, на электрофизические характеристики кристалла.

Соединения токопроводящими клеями позволяют получить надежный электрический контакт на различных подложках. В качестве основы токопроводящих клеев используют эпоксидные, полиимидные, силиконовые, полиамидоимидные смолы. Эпоксидные смолы являются лучшими в силу того, что они имеют большую адгезию, стойки к действию растворителей и химикатов, а процесс их отвердевания может протекать с большой скоростью. В качестве наполнителя в электропроводящих композициях чаще всего используют тонкие и ультратонкие порошки серебра, никеля, меди, золота, графита, сажи. Минимальное переходное сопротивление клея зависит от дисперсности токопроводящих наполнителей. Оптимальные размеры частиц составляют для сажевых 0,05 мкм, для графитовых 1,5–2,0 мкм, для металлических 2–7 мкм. Свойства двухкомпонентных электропроводящих клеев с металлическим наполнителем на основе эпоксидной смолы, разработанные американскими фирмами, приведены в табл. 2.9. Жизнеспособность клеев 45–60 минут, отверждение за 48 часов при 20°C или за 2 часа при 150°C [14].

Таблица 2.9. Свойства электропроводящих клеев

Клей	Ag, %	$\rho_v = 10^{-6} \text{ Ом см}$		R, Ом	
		25°C	150°C	25°C	150°C
A	77	336	195	0,0110	0,0083
B	85	169	103	0,0188	0,7100
C	76	368	184	0,0140	0,0070
D	85	427	1573	0,0200	0,0590
E	60	43	28	0,0089	0,0070

Для посадки кристаллов в корпус широко применяется клей ВК-32-200, который представляет собой смесь лака ФЛ-5111 (раствор фенолформальдегид-

ной смолы в этиловом спирте) и пластификатора (синтетическая резиновая смесь на основе синтетического бутадиеннитрильного каучука в бутилацетате) для большей эластичности. Отверждение клея ВК-32-200 сопровождается выделением воды и формальдегида. Токопроводящая композиция на основе клея ВК-32-200 содержит 30—35 % никелевого порошка с размером частиц менее 10 мкм и 0,3–0,45 % порошка монокристаллического кремния с размером частиц 0,5—2 мкм. Удельное объемное сопротивление композиции составляет $(1,5–2) \cdot 10^4$ Ом·см, предел прочности соединений на разрыв 10–15 МПа. Недостатком данной композиции является изменение ее прочностных свойств при последующих операциях (термокомпрессионная разварка выводов), а также сложность поддержания однородного состава в процессе приклеивания. Лучшие характеристики имеют токопроводящие композиции с металлическим наполнителем — порошком серебра. Так, композиция Ablebond 84 фирмы Ablestik имеет удельное сопротивление $1 \cdot 10^{-4}$ Ом·см, предел прочности соединений на разрыв – до 26 МПа.

Для расчета максимальных напряжений, возникающих при охлаждении кристалла полупроводника размером L , приклеенного слоем клея толщиной X , до температуры T , предложено уравнение [15]:

$$\sigma_{\max} = K(\alpha_s - \alpha_{si}) \cdot (T_g - T) \sqrt{\frac{E_a E_s L}{X}}, \quad (2.3)$$

где K – безразмерная константа, зависящая от формы и числа граней кристалла; E_a – модуль упругости при растяжении адгезива, E_s – модуль упругости подложки, α_s , α_{si} – коэффициенты линейного расширения подложки и кристалла, соответственно, град⁻¹.

Согласно уравнению, величина внутренних напряжений прямо пропорциональна корню квадратному из отношения L/X , т.е. возрастает по мере увеличения размера кристалла и снижается с увеличением толщины клеевого шва. Поэтому при посадке кристаллов больших размеров рекомендуется наносить клей толщиной не менее 25 мкм. Для сохранения требуемой толщины слоя клея в процессе отверждения и снижения возникающих при этом внутренних напряжений в композицию клея, содержащего 60–75 % по массе порошка серебра, добавляют 1–4 % стеклянных шариков размером 20–25 мкм.

2.7. Микропроволоки для контактных соединений

Перспектива использования материала микропроволоки в контактных соединениях зависит от степени его соответствия следующим основным требованиям:

- иметь высокую механическую прочность, жесткость, хорошую электропроводность;
- легко оплавляться в шарик сферической формы с поверхностью, свободной от окисных пленок;

– хорошо свариваться с материалом контактной площадки и выводной рамки при умеренных значениях амплитуды ультразвука, усилия нагружения и температуры;

– контактное соединение материала микропровода и площадки должно иметь высокую температурную стабильность и коррозионную стойкость в условиях эксплуатации;

– микропровода должна быть дешева и технологична при изготовлении.

Алюминиевую твердую АТ, полутвердую АПТ и мягкую АМ проволоки диаметром от 15 до 70 мкм получают волочением через алмазные волокнистые смазки 1–2% раствором мыльной эмульсии. Временное сопротивление разрыву проволок должно быть не менее 196, 98 и 73 Н/мм², а удельное электрическое сопротивление – $0,028 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Низкая температурная стабильность наиболее часто используемой контактной системы Au–Al, высокие цены на золотую микропровода, а также ряд других факторов вызвали значительный интерес к применению альтернативных материалов, способных заменить золотую микропровода, как практически единственный материал, используемый для сварки шариком встык. Такими материалами являются Cu, Pd, Ni и Ag, а также сплавы на их основе [16].

Требованию по электропроводности лучше всего соответствует медь, незначительно уступая серебру. При использовании атмосферы защитного газа воспроизводимость формы и размеров медных шариков значительно выше, чем у золотых и палладиевых шариков. На медной микропровода удается стабильно получать воспроизводимые шарики малого диаметра при уменьшении энергии разряда, в то время как для алюминия, золота и палладия это приводит к искажению сферической формы шариков. Этому способствуют отличные механические свойства, термическая и коррозионная стойкость, превосходная электрическая и термическая проводимость, возможность получения шарика воспроизводимых размеров и небольшого диаметра, невысокая стоимость. Кроме того, медь хорошо вытягивается в проволоку малого диаметра. Проволока изготавливается из электролитической меди чистотой 99,9–99,99%. Содержание таких примесей как S, Se, Te не должно превышать 0,1 массовых частей/миллион. В проволоке допускается присутствие одного из редкоземельных металлов или одного из металлов группы Mg, Ca, Ti, Zr, Hf, Li, Nd, K, Pb и C в количестве 0,5–3 массовых частей/миллион. Столь высокочистую Cu проволоку, содержащую 99,999% Cu получают вакуумной плавкой и зонной очисткой.

Микротвердость проволоки по Виккерсу должна быть от 35 до 60 ед. При более высокой микротвердости при сварке может быть повреждена диэлектрическая пленка кристалла; при микротвердости менее 35 ед. надежность микропроводных соединений оказывается недостаточной. Для присоединения к алюминиевым контактными площадками используется микропровода из сплава Cu–Sn двух составов: 50% Cu, 40% Sn, 10% Pb и 50% Cu, 40% Sn, 10% Zn [17].

Микропровода на основе высокочистой меди 99,99% имеет меньшую твердость, но для получения высококачественного шарика требуются специальные технологические приемы. Это связано с наличием на боковой поверхности

сти такой микропроволоки окисных пленок. При оплавлении медного шарика с помощью импульсного электрического разряда важную роль играет полярность микропроволоки. При отрицательной полярности микропроволоки на ней возникает диффузный дуговой разряд, в том числе и с боковой поверхности микропроволоки, что вызвано низкой работой выхода электронов с поверхности, покрытой оксидами меди. Диффузный разряд приводит к тому, что плавление микропроволоки начинается с боковой поверхности, а нерасплавленный кончик микропроволоки оказывается включенным в более мягкий материал оплавленного шарика. При сварке требуется дополнительное усилие для деформации твердого включения, что увеличивало риск повреждения кристалла. Для предотвращения получения неоднородного шарика изменяется полярность напряжения на микропроволоке в процессе сварки.

Наиболее распространенной и отработанной технологией изготовления микропроволоки, в том числе и медной, является волочение. В качестве заготовки используют прутки бескислородной меди МОБ диаметром 2,85 мм. Волочение со скоростью 1 м/с до диаметра 2,15 мм проводят через твердосплавные волокнистые типа "ВК", до диаметра 0,078 мм - через волокнистые типа "СКМ" и "АСБ", а затем, до диаметра 0,003 мм через волокнистые из природного алмаза в водно-масляно-мыльной эмульсии, обработанной ультразвуком.

Вакуумный отжиг проволоки происходит при скорости перемотки 0,08 м/с при температуре 650°C и остаточном давлении $6 \cdot 10^{-6}$ мм. Средняя прочность на разрыв тянутой медной микропроволоки диаметром 30 мкм после отжига составляет 18,8 г при относительном удлинении 15,4%.

Тянутая проволока как до отжига, так и после обладает рядом недостатков (неровная поверхность, наличие дефектов, примесей, нестабильность механических свойств по длине). Микропроволока, полученная литьем в стеклянную оболочку с последующим стравливанием стекла, обладает очень ровной поверхностью. Это объясняется тем, что в процессе изготовления проволоки металл соприкасается вначале с жидким, а затем с затвердевшим стеклом. Поверхность стекла не имеет царапин и неровностей. Хотя тянутая проволока обладает более высокой прочностью на разрыв, механические свойства литой микропроволоки более стабильны по длине.

Литую микропроволоку получают из гранул вакуумно плавленной меди. Навеску гранул меди массой 1 г. помещают в стеклянную трубку с опаянным концом и вместе с последней вводят в индуктор высокочастотной установки. Под действием магнитного поля индуктора навеска металла плавится и размягчает примыкающие к ней стенки стеклянной трубки. Кроме расплавления металла магнитное поле индуктора обеспечивает поддержание металла в средней части индуктора во взвешенном состоянии в виде микрованны расплавленного металла в вязкой стеклянной оболочке на конце стеклянной трубки. В дальнейшем, путем прикосновения к донцу микрованны стеклянным штабиком, часть ее оболочки оттягивается на приемное устройство в виде непрерывной медной жилы.

На пути от микрованны до приемного устройства микропровод проходит через кристаллизатор в виде струи охлаждающего агента. Процесс формирова-

ния стеклянного капилляра осуществляется непрерывно за счет стекла, стягиваемого со всей поверхности микрованны, при этом убыль стекла равномерно компенсируется непрерывной подачей стеклянной трубки в зону индуктора. Медную микропроволоку освобождают от стеклянной изоляции путем ее стравливания в 20% растворе плавиковой кислоты. Средняя прочность на разрыв литой медной микропроволоки диаметром 29 мкм составляет 9,9 г при относительном удлинении 11%.

Для предотвращения окисления медного шарика при его оплавлении необходимо в качестве защитного газа использовать аргон, содержащий не более 0,4% кислорода. Твердость шарика зависит от твердости материала микропроволоки и температуры окружающей среды, т.е. температуры защитного газа. Твердости шариков, оплавленных на медных микропроводах различных типов, при температурах защитного газа 20⁰С и 220⁰С составляет 65,7 и 61,5 соответственно.

Главной особенностью сборки ИС с использованием медной микропроволоки является более высокая твердость медного шарика по сравнению с шариком, оплавливаемым на золотой микропроволоке. Скорость деформирования медного шарика в процессе нагружения существенно ниже, чем золотого, что приводит к трещинам в материале кристалла, находящегося под нагружаемой контактной площадкой. Для исключения образования трещин в кристалле при сварке медным шариком необходимо выполнение нескольких условий:

- твердость медного шарика до начала сварки должна быть минимальной,
- необходимо обеспечить высокую скорость деформации медного шарика в процессе нагружения,
- режимы сварки не должны быть жесткими, т.е. амплитуда и длительность УЗ импульса, а также усилие нагружения должны быть минимальными.

Получать стабильную сварку при отсутствии трещин можно лишь при одновременном выполнении этих условий. Поскольку эти условия частично противоречивы, то диапазон свариваемости является значительно более узким, чем при сварке золотым шариком.

Проволочный монтаж медной микропроволокой ведут на установках термозвуковой сварки, оснащенных блоком формирования шарика с напряжением разряда 4 кВ, устройством для поворота разрядника, соплом для подачи и нагрева защитного газа, а также приспособлением для подвижного крепления сопла. Шарик оплавливают в атмосфере аргона при температуре 220⁰С и при длительности высоковольтного импульса 2 мс. Использование экрана сокращает расход аргона до 12 см³/с.

Формирование соединений медным шариком возможно и УЗ микросваркой. Мощность УЗ импульса на 1 и 2 сварке составляет соответственно 0,4 и 0,6 Вт, а длительность импульсов соответственно 55 и 65 мс. При сборке ИС использовали тянутую и литую медную микропроволоку фирмы Heraeus диаметром 25 мкм. Давление на 1 сварке составляло 45 г, на 2 сварке – 50 г. Для всех типов медной микропроволоки получена стабильная сварка как на контактных площадках кристалла, так и на траверсах выводной рамки (рис. 2.8).

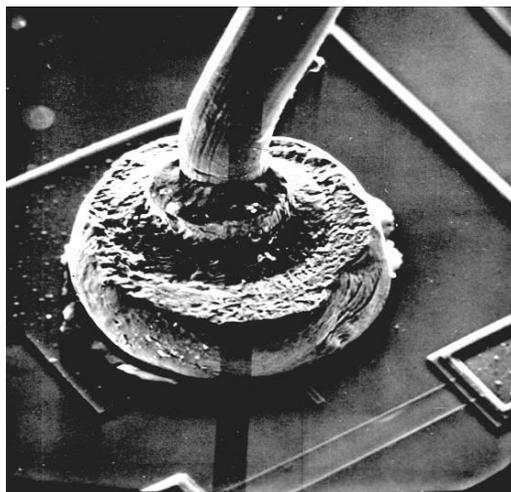


Рис. 2.8. Микросварное соединение медным шариком в защитной среде

Средняя прочность на разрыв перемычки длиной 1,5 мм составляла для тянутой медной микропроволоки 11,0 г., для литой медной микропроволоки и для медной микропроволоки фирмы Heraeus – 9 г. При этом для литой микропроволоки и микропроволоки фирмы Heraeus трещины и кратеры отсутствовали, а для тянутой микропроволоки у 15–20% образцов сварных соединений наблюдались трещины и выколы. В то же самое время литая микропроволока имела значительно меньшую жесткость, чем тянутая микропроволока фирмы Heraeus, что затрудняло работу с ней и не обеспечивало достаточной жесткости получаемых перемычек.

Контроль наличия трещин и кратеров под контактными площадками после приварки к ним медных шариков осуществляли путем стравливания меди и медьсодержащей фазы взаимной диффузии Cu–Al в 10% растворе сернокислового аммония. Визуальный контроль с помощью электронного микроскопа показал отсутствие трещин и кратеров при оптимальных режимах сварки для литой медной микропроволоки фирмы Heraeus.

Вследствие значительного различия в твердости медного шарика и алюминиевой контактной площадки при сварке возможно интенсивное вытеснение более мягкого алюминия на периферию контактной площадки. При более жестких режимах практически весь алюминий вытесняется из пятна контакта, либо вступает в диффузионное взаимодействие с медью. Вероятно, увеличение толщины контактной площадки позволит повысить качество сварных соединений. Другим путем повышения качества сварки и исключения растрескивания кристалла может быть повышение твердости алюминия контактной площадки.

Широкое применение приборов силовой электроники повышает требования к механической прочности и температурной нагрузке проволочных соединений. Для контактирования электронных компонентов применяют проволоки из алюминия увеличенного диаметра от 150 до 500 мкм. Однако в соединении происходит термомеханическое рассогласование между материалом проволоки и контактируемыми компонентами, которое инициирует образование трещин. Разработаны армированные типы микропроволок из алюминия, содержащие волок-

на меди, изготавливаемые методом горячего прессования, радиального обжата и вытягивания. Волокна меди увеличивают прочность, электропроводность (на 10%) и снижают коэффициент температурного расширения. Предел прочности композитных проволок Al–Cu составляет 125–175 МПа в диапазоне температур от –40 до 125°C, прочность на срез соединений на 30–50% превышает значения для алюминиевых проволок того же диаметра.

2.8. Защитные жидкости и покрытия для пайки

Расплавленный припой в ваннах лужения и пайки соприкасается с воздухом и окисляется. Этот процесс происходит особенно активно при пайке волной припоя, так как в контакт с воздухом вступают все новые порции припоя. Образуется так называемый шлам, или дросс. Частицы шлама подаются в ванну, перемешиваются с припоем и снова затягиваются насосом в волну припоя, а из нее – в паяные соединения и на поверхность платы. Если не принимать специальных мер, то расход припоя на окисление и угар в ванне средних размеров может достигать 3 кг и более за смену.

Для защиты поверхности расплавленного припоя применяют защитные жидкости, которые кроме защиты от окисления, выполняют ряд функций: восстанавливают оксиды меди; снижают поверхностное натяжение припоя и увеличивают его смачивающую способность; уменьшают наплавы припоя на широких проводниках, а также сокращают такие дефекты, как перемычки и сосульки; позволяют на 10–20°C снизить температуру пайки, что уменьшает тепловое воздействие на полупроводниковые приборы. Основными компонентами защитных жидкостей являются: минеральные масла на основе углеводородов с высокой термической стабильностью, жировые масла растительного или животного происхождения, обладающие смачивающими свойствами, кремнийорганические жидкости и другие. Защитная жидкость должна иметь следующие свойства:

- температуру вспышки в открытом месте, превышающую температуру пайки;
- высокую термическую стабильность при температуре расплавленного припоя в течение 1–2 смен работы линии пайки;
- слабо испаряться и легко удаляться обычными растворителями;
- показатель кислотности свежей жидкости не должен превышать 14 мг КОН/г.

Составы и свойства некоторых применяемых в промышленности защитных жидкостей приведены в табл. 2.11 и 2.12. Основой большинства из них являются минеральные масла на основе углеводородов с высокой термической стабильностью и температурой вспышки. Применяются также масла растительного или животного происхождения, обладающие значительно лучшими смачивающими свойствами, но худшей стойкостью к окислению при повышенной температуре и более низкой температурой вспышки.

В качестве защитных жидкостей при групповой пайке используют ЖЗ-1, ТП-22; ВМ-71; ЖЗФ-350, ЖЗК-400 [17]. Способы подачи жидкости в зону пайки могут быть различными: с помощью валика, соприкасающегося с волной припоя, капельным методом, внутрь объема припоя. Поверхностное натяжение

защитных жидкостей колеблется в пределах 0,017–0,028 Н/м (у расплавленных металлов 0,1–1,0 Н/м). Защитную жидкость подают в зону пайки различными способами: из бачка в узкую ванночку с помощью валика, соприкасающегося с волной припоя; из отдельной емкости через регулирующий кран в нижний отсек сопла, где дробится потоком припоя на мелкие капли и пленки (система Intermix фирмы Hollis Engineering); на зеркало припоя; циркулирует между подогреваемой емкостью и ванной с припоем.

Расход защитной жидкости зависит от конструктивных особенностей паяльной установки, способа подачи и срока службы жидкости. При постоянной подаче защитной жидкости на волну припоя расход составляет 2–4 дм³ в смену, при подаче внутри объема припоя – до 10 дм³ в смену на объем 200 кг припоя.

Таблица 2.11. Составы защитных жидкостей

Марка жидкости	Компоненты	Содержание, масс., %
ЖЗ-1	Масло цилиндрическое № 52	79–81
	Кремнийорганическая жидкость	16–17
	ПМФС-6 Олеиновая кислота	4,9–1,8
ВМ-71	Масло авиационное № 20	8–90
	Жир технический (глицерид)	7–15
	Олеиновая кислота	3–5
ТП-22	Масло ВИ-250 или П-28	90–93
	Олеиновая кислота	7–10
ЖЗФ-350	Закалочное масло МЗМ-120	85–95
	Фосфаты подсолнечного масла	1–10
	Канифоль фумаризованная	0,5–8,0
	Ионол (4-метил-2,6-дитретичный бутилфенол)	1 м. ч. на 100 м. ч. жидкости
ЖЗК-400	Фосфаты подсолнечного масла	4–8
	Ионол	1–1,5
	Стеарат свинца	1–2
	Кремнийорганическая жидкость	Остальное
	ПМФС-4	
Фирма Shevron (США)	«Брайтсток-185»	90
	Лярд	5
	Олеиновая кислота	5
	Фенольный антиоксидант	0,25

Таблица 2.12. Свойства защитных жидкостей

Наименование	Значение параметра
--------------	--------------------

параметра	ЖЗ-1	ВМ-71	ТП-22	ЖЗФ-350	ЖЗК-400	Shevron
Цвет	Темный	Темный	Темный	Темный	Светлый	Светлый
Плотность, г/см ³	0,97	0,896	0,91	0,9	0,9	-
Вязкость при 100°С, сСт	61,9–63,8	15–17	20–24	-	-	-
Температура, °С						
вспышки	250	252	230	218	400	250
воспламенения	270	-	250	250	-	-
застывания	-4	-4	-10	-10	-10	-10
Кислотное число, мг КОН/г	5,38	10,36	17	14-18	22	22
Время работы в расплаве, ч	10	8	4–6	6	-	10

Применение защитных жидкостей дает значительную экономию припоя. Расход его на угар снижается до 0,5 кг в смену. Несмотря на перечисленные преимущества защитных жидкостей их используют не всегда, так как их применение влечет за собой и ряд отрицательных моментов. Повышается опасность пожара; возрастают расход промывочных жидкостей на очистку оборудования, затраты на их приобретение и дополнительное обслуживание.

Разработаны составы водорастворимых защитных жидкостей (ВЗЖ) на основе простых олигоэфиров с добавлением стабилизирующих и антиоксидантных добавок, остатки которых отмываются деионизованной водой. При использовании ВЗЖ в установках волновой пайки при температуре 260–275°С работоспособность защитной жидкости сохраняется в течение 35–40 часов. Расход припоя при этом снижается в 1,5–2 раза [19].

Вместо защитных жидкостей применяют также деоксиданты ELSOLD в виде таблеток, содержащих раскислитель – фосфор, из расчета 3–таблеток на 10 кг припоя.

2.9. Материалы для очистки соединений

Как правило, после пайки на плате остается некоторое количество флюса и продуктов его разложения. Они могут вызвать коррозию, ухудшить электрические параметры схемы, деградацию паяных соединений. Необходимость очистки платы после пайки решается в зависимости от требуемой степени надежности аппаратуры, условий ее эксплуатации, назначения изделия. При использовании защитных масел очистка обязательна во всех случаях.

В процессе пайки волной припоя часть флюса с поверхности печатных узлов испаряется и осаждается на конвейере. Налипание флюса на пальцы конвейера приводит к тому, что не обеспечивается постоянная высота платы над волной припоя, снижается надежность процесса пайки, увеличивается число непропаев вследствие загрязнения изделия нагаром флюса с конвейера.

Регулярной очисткой оборудования пайки достигается двойной эффект. С одной стороны, увеличивается срок службы оборудования, с другой стороны предотвращают ряд потенциальных технологических дефектов. Современные требования производства ставят жесткие задачи по повышению производительности и уменьшению времени простоя сборочных линий во время обслуживания. Поэтому необходимо проводить очистку оборудования пайки максимально быстро и безопасно.

Для очистки и промывки плат применяют различные растворители и составы. Моющие составы должны быть способны растворять как связующее вещество, так и основной материал флюса. Удаление остатков канифольных флюсов осуществляют спиртом, спирто-бензиновой смесью, трихлорэтиленом, четыреххлористым углеродом. Однако эти жидкости пожароопасны и токсичны. Широко применяемые в 70-е годы фтор- и хлоруглеродистые растворители: хладон-113 и Ф-114В с температурой кипения 47,57 и 47,25⁰С соответственно, обеспечивали высокую степень очистки, были не пожароопасными, мало токсичными, химически стойкими и универсальными растворителями. После подписания Монреальского соглашения фреоновые технологии, как экологически опасные, оказались под запретом.

Другой класс промывочных жидкостей – это водные растворы поверхностно-активных веществ (ПАВ). Особенность работы ПАВ при очистке заключается в том, что активные компоненты раствора оказываются связанными с частицами загрязнений, что приводит к необходимости частой смены промывочной жидкости. ПАВ недостаточно эффективны при удалении остатков высокополимеризованных флюсов и бессвинцовых припоев. ПАВ являются гигроскопичными и могут оставаться на очищенной поверхности, адсорбируя молекулы воды и создавая тем самым условия для развития очагов коррозии. Промывочные жидкости на основе ПАВ требуют утилизации.

Промывочная жидкость VIGON RC101 компании Zestron на водной основе по MPC (Micro Phase Cleaning) технологии обеспечивает удаление нагара канифольных и водосмываемых флюсов с низким содержанием твердых веществ. Активные компоненты MPC, присутствующие в растворе промывочной жидкости имеют форму микроскопических капелек–микрофаз [20]. Микрофазы могут эффективно удалять с поверхности плат и соединений жировые загрязнения, остатки флюса и остатки неотвержденного эпоксидного клея. Удаленные частицы загрязнений освобождаются микрофазами и переходят в раствор, таким образом, происходит самоочищение микрофаз (рис. 2.9). В отличие от ПАВ, у промывочных жидкостей с микрофазами не происходит истощения активных компонентов, и после очистки на поверхности не остается загрязнений и налета. Микрофазы не накапливают загрязнения, как ПАВ или спирто–бензиновая смесь, а работают в качестве переносчика. Поскольку частицы загрязнений не растворяются полностью в промывочной жидкости, то они легко удаляются фильтрацией. Водная основа сокращает время и делает процесс безопасным. Ванна отмычки оснащается двухступенчатой системой поглощения загрязнений: предвари-

тельным фильтром с размерами ячеек 20 мкм и сновным с размерами ячеек 5 мкм.

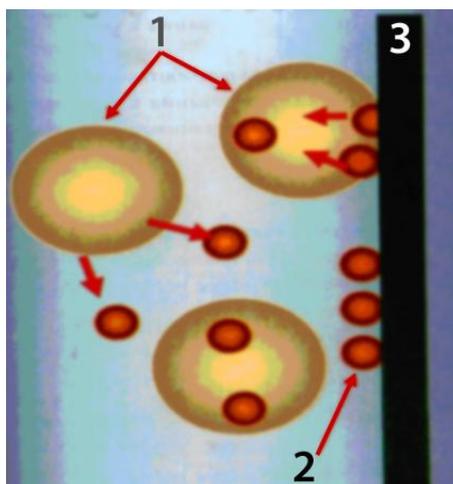


Рис. 2.9. Удаление загрязнений микрофазами: 1 – МРС-фазы, 2 – загрязнения, 3 – поверхность

Для интенсификации процесса отмывки, особенно под низкопрофильными корпусами компонентов, используют центрифугирование, струйную отмывку под высоким давлением, подачу сжатого воздуха (барботаж) и использование энергии УЗ колебаний. Высокая эффективность воздействия УЗ колебаний частотой 35–44 кГц достигается благодаря возникновению акустической кавитации, созданию микро– и макропотоков в жидкой среде.

Особенность очистки печей оплавления состоит в том, что перед обслуживанием их приходится охлаждать до комнатной температуры, чтобы обеспечить пожаробезопасность. Из-за низкой точки вспышки традиционных материалов их нельзя распылять их на горячие поверхности печей. Процесс охлаждения может занять несколько часов, что вызывает простаивание всей сборочной линии. Поскольку промывочная жидкость VIGON RC101 не имеет точки вспышки, это позволяет начинать обслуживание при температуре 40°C, при которой рабочий будет чувствовать себя комфортно без опасения обжечься об горячие поверхности печи. Промывочную жидкость наносят по всей загрязненной поверхности и вытирают тканым или бумажным материалом растворенные загрязнения.

Не менее важно сохранять в чистоте пальцы конвейера установки пайки волной припоя. Для автоматической очистки установки пайки волной припоя могут оснащаться специальной системой с замкнутым циклом. В ней промывочная жидкость распыляется на загрязненный конвейер и стирается щетками и тем самым обеспечивается постоянное высокая степень чистоты конвейера и увеличивается срок его службы. Использование таких жидкостей гарантирует безопасность для здоровья персонала, так как она не имеет испарений, приводящих к раздражению, что подтверждено классификацией HIMS (Система идентификации раздражающих веществ).

Список литературы к главе 2

1. Manko H.H. Solders and Soldering, Materials, Design, Production and Analysis for Reliable Bonding. – N.Y.: McGraw Hill, 2001. – 719 p.
2. Чистяков Ю.Д., Яковлев Г.А. Физико-химические пути повышения надежности соединений, паянных легкоплавкими припоями // Обзоры по электронной технике. Сер. 7 ТПО. Вып. 2(625).– М.: ЦНИИ «Электроника», 1979. – 41 с.
3. Bangs E.R., Beal R.S. Effect of Low Frequency Thermal Cycling on the Crack Susceptibility of Soldered Joints // Welding Journal. – 1975. – V. 54. – № 10. – P. 113–119.
4. Портной К.И., Бабич Б.Н. Дисперсноупрочненные материалы. – М.: Металлургия, 1974. – 325с.
5. Lead-Free Soldering in Electronics / Ed. by K. Suganuma. – N.Y.: Marcel Dekker, 2004. – 342 p.
6. Медведев А.М. Бессвинцовые технологии монтажной пайки // Электронные компоненты. – 2004 . – №11. – С. 29–34.
7. Дипстратен Г. Как справиться с примесями при пайке волной припоя // Технологии в электронной промышленности, 2012, № 3.– С. 41–46.
8. Evolution of microstructure of Sn-Ag-Cu solder joints exposed to ultrasonic waves during solidification / R.K. Chinnam [and etc.] // Acta Materialia. – 2011. – № 59. – P. 1474–1481.
9. Belyakov S.A. Ultrasonic Modification of Sn-Ag-Cu Alloy Microstructure // 9th Inter. Workshop and Tutorials, EDM'2008. 1-5 July 2008. Erlagol. – P. 58–59.
10. Ланин В.Л., Шпилевский Э.М., Хотькин В.Т. Модификация структуры бессвинцовых припоев повышает качество паяных соединений // Электроника. Наука. Технология. Бизнес.– 2012. -№ 7. – С. 34–38.
11. Алексеев, С. Как совместить бессвинцовые компоненты с оловянно-свинцовыми припоями? / С. Алексеев // Электроника. Наука. Технология. Бизнес.– 2016. – № 3(00064). – С. 139–146.
12. Большаков А. Флюсы на водной основе. Новые возможности пайки волной припоя // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – № 4.– С. 78–79
13. Косолапов Н.А., Рабкин В.Б., Шапошников О.А. Ультразвуковое распыление металлических расплавов. Порошки припоев для паяльных паст.– М.: ЦНИИ «Электроника»1990.–52 с.
14. Левицкий Л.М. Электропроводящие клеи для микроэлектроники //Зарубежная электронная техника. №7 (339) 1989.– М.: ЦНИИ «Электроника».– С. 62-68.
15. Захаров А.Л., Асвадунова Е.И. Расчет тепловых параметров полупроводниковых приборов. – М.: Радио и связь. – 1983. – 184 с.

16. Harmann G.G. Wire bonding in microelectronics.— N.Y. : McGraw Hill, 2010. – 432 p.
17. Кузьмин Л.Н., Ионина Н.М. Технология изготовления и применения микропровода при сборке полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: ЦНИИ Электроника.–1987. – 38 с.
18. Автоматизация и механизация сборки и монтажа узлов на печатных платах / А.В. Егунов [и др.]; под ред. В.Г. Журавского. – М.: Радио и связь, 1988.– 280 с.
19. А.с. 1639921 СССР. Состав для защиты зеркала расплавленного припоя от окисления / Н.И. Мирошниченко [и др.] 07.04. 1991.
20. Большаков А. Как выбор промывочной жидкости может снизить расходы на отмывку // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 3.– С. 52–54.

ГЛАВА 3

ПАЯЕМОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

3.1. Паяемость и критерии ее оценки

Паяемость – это способность материала смачиваться расплавленным припоем, вступать с ним в химическое взаимодействие и образовывать качественное паяное соединение. Паяемость зависит от свойств паяемых материалов и режимов пайки. С точки зрения технологии пайки паяемость — это отношение паяемых материалов и припоя к основным процессам, происходящим при пайке (нагрев, плавление, смачивание, капиллярное течение, растворно-диффузионное взаимодействие, кристаллизация и др.) [1]. Таким образом, паяемость зависит не только от физико-химической природы металлов и припоя, но и от способа и режима пайки, от флюсующих сред, условий подготовки поверхностей и т.д.

Для образования паяного соединения необходимо смачивание поверхности основного металла расплавом припоя, что определяет возможность дальнейшего образования между ними химических связей. При физической возможности образования соединения его надежность гарантируется с технологической точки зрения при условии выполнения оптимальных режимов процесса пайки. Паяное соединение должно обеспечивать герметичность и требуемую прочность при различных температурах эксплуатации изделия.

Смачивание материала заключается в замене межатомных связей в твердой фазе образование металлической, ковалентной или иной связи атомов основного материала с припоем на границе раздела между ними. Физически смачивание проявляется в растекании жидкого припоя по поверхности нагретого материала до установления равновесия сил поверхностного натяжения. Количественными характеристиками смачивания являются угол смачивания θ , растека-

ния - коэффициент растекания K_p (ГОСТ 23904 - 79), которые определяются из соотношений:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{1,2}}, \quad (3.1)$$

$$K_p = S_p / S_o, \quad (3.2)$$

где $\sigma_{1,2}$, $\sigma_{2,3}$, $\sigma_{1,3}$, – поверхностные натяжения на границах раздела соответствующих сред; S_p , S_o – площади растекания и исходной заготовки припоя соответственно.

Отличной паяемости соответствуют значения $\theta < 10$, $K_p > 1$, хорошей $10 < \theta < 25$, удовлетворительной и $\theta < 90$. Коэффициент растекания по формуле (3.2) зависит от массы исходного припоя и не дает наглядного представления о характере изменения паяемости, а метод определения достаточно трудоемок.

Для количественной оценки паяемости предложен фактор растекания P [2]:

$$P = 100 (D - H) / D, \quad (3.3)$$

где D – диаметр сферы, имеющий объём, эквивалентный используемому припою; H – высота капли припоя.

Если отсутствует сила тяжести, то капля припоя будет иметь форму сферы, где D будет эквивалентно H и фактор растекания равен нулю, что свидетельствует об отсутствии паяемости. Качественная оценка паяемости покрытий в соответствии с параметрами смачивания и растекания приведена в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Критерии оценки паяемости

Фактор растекания	Паяемость	Величина угла смачивания, вычисленная по площади растекания
60	Очень плохая	50°
60 – 70	Плохая	50–34°
70 – 80	Удовлетворительная	34–12°
80 – 90	Хорошая	12–3°
90	Отличная	3°

Учитывая, что в реальных условиях пайки высота "лежащей" капли расплавленного припоя H_{np} всегда меньше диаметра гипотетической сферы припоя D , для расчета коэффициента растекания припоя K_p предложено выражение [3]:

$$K_p = \frac{H_{np} - H_k}{H_{np}}, \quad (3.4)$$

где H_{np} – высота "лежащей" капли расплавленного припоя, определяемая как:

$$H_{np} = \frac{\sqrt{2\sigma(1 - \cos \theta)}}{\rho g}, \quad (3.5)$$

где ρ – плотность припоя.

По данной методике отличной паяемости соответствует $Kp = 1$ и появляется возможность контролировать процесс растекания по высоте капли припоя. При испытаниях на растекание гальванических покрытий со значительной толщиной оксидных пленок установлено, что припой растекался под ними, что затрудняло контроль площади. Поэтому испытания на площадь растекания не подходят для состаренных толстых покрытий.

По критерию паяемости все многообразие паяемых материалов различной физико-химической природы можно классифицировать на основные группы: легкопаяемые, среднепаяемые, труднопаяемые и непаяемые (табл. 3.2) [4]. Методы оценки паяемости классифицируют на следующие виды: капиллярное проникновение припоя, растекание припоя, погружение в припой, время смачивания. Критическая оценка методов испытаний позволяет правильно выбрать материалы для получения высокой надёжности контактных соединений и оценить оптимальные параметры операций пайки (табл. 3.3).

Паяемость материалов оценивают различными методами: по смачивающей способности припоев, например, замером площади растекания припоя или крайним углом смачивания; по глубине проникновения припоя в зазор горизонтального типа или высоте подъема припоя в капиллярном зазоре при вертикальном расположении образца; измерением усилия, действующего на образец основного металла, частично погруженного в расплав припоя.

Таблица 3.2. Классификация материалов по паяемости

Группа материалов по паяемости	Материалы	Угол смачивания, град	Kp	Технологические условия пайки
Легкопаяемые	Sn, In, Au, Ag, Pd, Cu	0–12	0,98–0,80	Канифольные флюсы, вакуум
Среднепаяемые	Pb, Zn, Fe, Ni, Ni-Fe, Cu-Sn, Cu-Zn	5–20	0,82–0,60	Активированные флюсы. Восстановительная атмосфера
Труднопаяемые	Al, Mg, Si, Ti, Mo, Ta, сплавы	2–60	0,6–0,5	Активные флюсы специальные припои
Непаяемые	Стеклокерамика, керамика, ферриты	120–160	–	Металлизация поверхности

Таблица 3.3. Применение методов испытаний на паяемость

Испытываемые материалы и компоненты	Методы испытаний			
	Капиллярное проникновение	Растекание	Погружение	Время смачивания

Припой	■	■	■	■
Флюсы	■	■	■	■
Материалы соединений	■	■	■	■
Покрyтия	□	■	■	■
Проводники плат	–	□	■	■
Металлизированные отверстия	■	–	□	■
Выводы компонентов	–	□	■	■

■ – высокая достоверность, □ – невысокая достоверность результатов

3.2. Методы оценки паяемости погружением в расплав

В методе погружения тестируемый компонент, офлюсованный и подогретый, погружают в расплавленный припой в небольшой ванне с постоянной температурой при заданной скорости на заданную глубину, или он плавает на поверхности припоя определённое время. Это самый простой из всех методов оценки паяемости, однако характеризуется субъективностью оценки степени смачивания.

Компонент лучше всего держать в зажиме из нержавеющей стали и полностью погружать во флюс, используемый в производственном процессе. Излишек флюса удаляют фильтрованной бумагой. После того, как оксидная плёнка снята с поверхности припойной ванны, образец погружают в припой либо вручную, либо с помощью механизмов, обеспечивающих постоянную скорость погружения от 20 до 25 мм•с⁻¹.

Рекомендуемые времена полного погружения приведены в табл. 3.4. Для многих электронных компонентов исследуемые области могут быть погружены не менее чем на 2 мм ниже припойного мениска. Большие плоские компоненты, такие как микросхемы в керамическом корпусе, погружают таким образом, чтобы не подвергаться их термическому нагреву. В таком случае компонент предпочтительно держать на поверхности припоя.

Припои для метода погружения имеют составы: 60Sn-40Pb, 63Sn-37Pb, или 62Sn-36Pb-2Ag, которые наиболее часто используются в производстве. Если компоненты имеют выводы, покрытые чистым оловом, возможно расхождение между результатами метода погружения и производственными процессами, такими как парофазная пайка при 215⁰С, с нагревом ниже точки плавления олова. Условие (а) позволяет тестировать компоненты при относительно низкой температуре, обычно используемой для парофазной пайки. Условие (b) – обычная оценка пригодности к пайке сборок на печатных платах волной припоя, условия (c) и (d) предназначены для оценки смачиваемости компонентов и погружения в волну припоя [5].

Таблица 3.4. Рекомендуемые условия испытания на паяемость

Условия испытаний	a	b	c	d
-------------------	----------	----------	----------	----------

Время погружения, с	3±0.3	2±0.2	5±0.5	30±1
Температура припоя, °С	215±3	235±5	260±5	260±5
Контроль смачиваемости	+	+		
Контроль несмачивания			+	
Контроль растворения металлизации				+

После удаления из припойной ванны, остатки флюса убираются подходящим растворителем, и паяемые поверхности оцениваются визуально. Поверхности должны быть покрыты ровным и блестящим слоем припоя не более чем с минимальным количеством отдельных недостатков, таких как небольшие отверстия, несмачиваемые области. При визуальной оценке требуется покрытие припоем до 95% поверхности и не более чем 5% несмачиваемой поверхности. При контроле методом погружения смонтированные компоненты после флюсования медленно погружаются в расплавленный припой при угле 45 градусов.

После полного погружения немедленно начинается удаление. Минимальное время, необходимое для качественной пайки, может быть оценено видимой проверкой. Метод погружения прост в реализации, однако не даёт информации о скорости смачивания, которая может достигаться в течение определённого времени.

Метод баланса смачивания (Wetting Balance Test) состоит в прямом измерении сил смачивания и работы адгезии. Ванна с припоем 1 движется вверх с помощью привода 2 и эксцентрика 3, при этом в нее погружается исследуемый образец 4, закрепленный на датчике 5 (рис. 3,1,а). Датчик тензометрического типа преобразует усилие в электрический сигнал, который усиливается тензометрическим усилителем 6 и подается на самописец 7. Пока образец не нагрет, смачивание отсутствует, мениск припоя вогнут вниз, на образец действует только выталкивающая сила припоя F :

$$F_a = S h g , \quad (3.6)$$

где S – площадь образца, h – глубина погружения.

При полном смачивании в точке В значение силы смачивания равно F_1 , при отрыве образца в точке С сила смачивания достигает F_2 (рис. 3.1,б). Скорость погружения образцов выбирается в пределах 0,2–0,4 мм/с, время погружения 4–5 с, глубина 0,8–2,0 мм. Мерой паяемости служат сила F_1 и время t_1 , за которое она достигает этого значения. Косинус краевого угла смачивания находят по формуле:

$$\cos \theta = (F_1 + F_a) / F_2 . \quad (3.7)$$

Процесс смачивания носит релаксационный характер и изменение силы смачивания описывается уравнением [6]:

$$f = f_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (3.8)$$

где f_0 – натяжение смачивания, равное максимальному значению силы смачивания на единицу длины периметра нижнего торца образца; τ – время релаксации смачивания; t – время, отсчитываемое от момента контакта образца с расплавом.

Время релаксации τ определяют как время достижения силы смачивания, равной $[(e-1)/e]f_0$. Величина натяжения смачивания:

$$f_0 = \sigma \cos \theta. \quad (3.9)$$

Этот метод введен в европейские и международные стандарты (MIL–DIN–JIN–IPC) и применяется для оценки паяемости широкого круга покрытий, печатных плат, чиповых компонентов, эффективности активированных флюсов и бессвинцовых припоев.

Менискограф Metronelec (Швейцария) MeniscoST60 Wetting Balance (рис. 3.2) обеспечивает глубину погружения образцов в расплав припоя от 0,1 до 1,0 мм с шагом 0,1 мм со скоростью от 1 до 50 мм/с. Время выдержки и наблюдения от 1 до 30 с. Хорошей смачиваемости компонентов соответствуют значения сил поверхностного натяжения припоя от 350 до 450 мН.

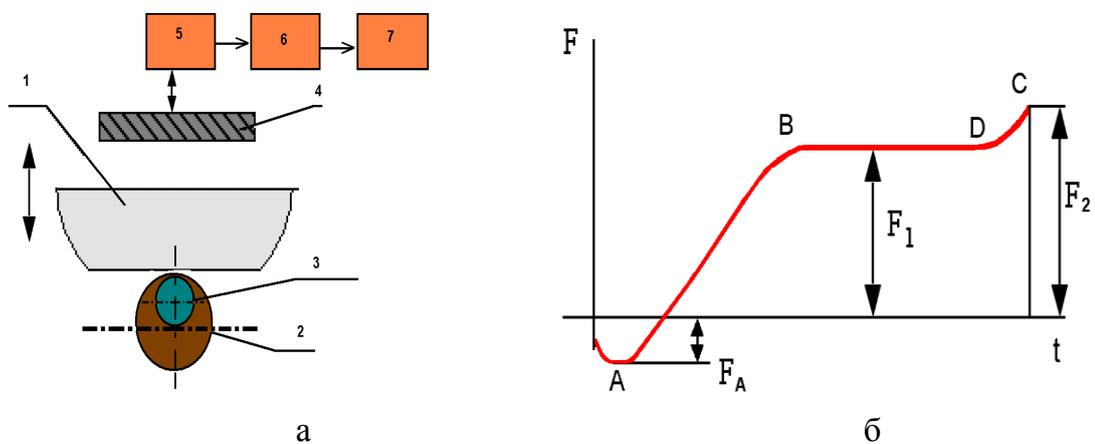


Рис. 3.1. Схема (а) и кривая (б) менискографического контроля смачивания

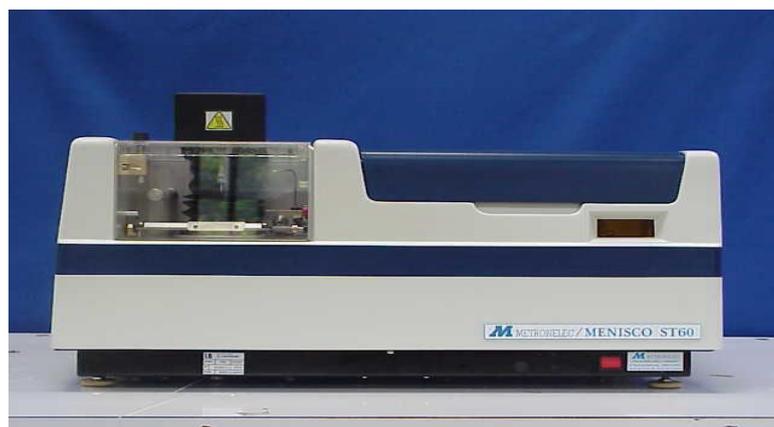


Рис. 3.2. Менискограф MeniscoST60 Wetting Balance

Тензометрический метод контроля паяемости позволяет изучать процессы смачивания длительностью не менее $1 \cdot 10^{-3}$ с и чувствительностью $5 \cdot 10^{-5}$ Н. Точность измерения f_0 составляет $\pm(2-3)$ %, $\tau - \pm 5$ %, угла смачивания ± 1 %, $\sigma - \pm(4-5)$ % .

Методика испытаний выводов на паяемость с помощью менискографа имеет некоторые недостатки. Время смачивания связано со скоростью погружения образца в припой и зависит от ряда факторов: массы образца, теплопроводности материала, активности флюса, состояния поверхности торца образца и других. В результате данные по силе смачивания и времени смачивания могут не коррелировать или даже противоречить друг другу.

3.3. Методы оценки паяемости по капиллярному проникновению и площади растекания припоя

Испытания на капиллярное проникновение используют для оценки влияния зазора соединения, активности флюса или состава припоя. Капиллярное пространство создаётся между двумя плоскими металлическими листами (рис. 3.3,а). Соединяемые поверхности листов флюсуют, подогревают и погружают в ванну с расплавленным припоем на определённое время. После чего листы извлекают, охлаждают и измеряют глубину проникновения припоя. Для оценки паяемости применяют нахлесточные или уголковые образцы, образующие горизонтальный зазор. Коэффициент проникновения K припоя в зазор горизонтального типа в присутствии флюса определяется по формуле [7]:

$$K=3l^2/2td, \quad (3.10)$$

где l – глубина проникновения припоя; d – зазор между образцами; t – время.

Припой в капиллярном зазоре при вертикальном его расположении поднимается на высоту $H = (2\sigma \cos\theta)/Rcg$, где R – радиус капилляра.

Скорость течения в капилляре выражается соотношением:

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{R\sigma}{4\eta l}, \quad (3.11)$$

где l – расстояние, на которое припой проник в капилляр за время t ; η – вязкость припоя. Интегрирование выражения (3.9) дает:

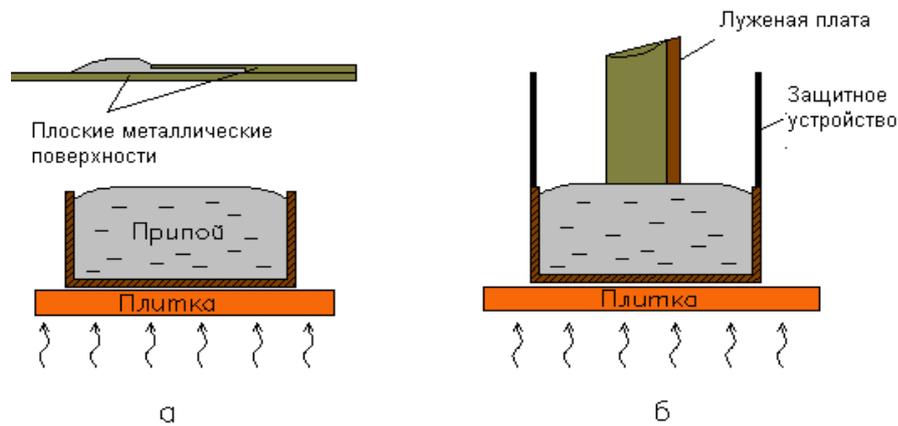


Рис. 3.3. Испытание на капиллярное проникновение между плоскими металлическими поверхностями (а) и лужеными платами (б)

$$l = \left(\frac{\sigma \cdot \cos \theta}{\eta \cdot 2} \right) Rt. \quad (3.12)$$

Коэффициент проникновения припоя в данном случае равен:

$$K = \left(\frac{\sigma \cdot \cos \theta}{\eta \cdot 2} \right). \quad (3.13)$$

Если в процессе капиллярного проникновения припой должен вытеснять жидкий флюс, то коэффициент проникновения равен:

$$K = \frac{\sigma_{np.\phi} \cos \theta}{2(\eta_{np} + \eta_{\phi})}, \quad (3.14)$$

где η_{np} , η_{ϕ} – вязкость припоя и флюса соответственно.

Таким образом, значение коэффициента проникновения прямо пропорционально поверхностному натяжению припоя, косинусу угла смачивания и обратно пропорционально вязкостям припоя и флюса.

Вследствие окисления металлических поверхностей или изменений в активности флюсов во время предварительного нагрева могут быть аномальные результаты. Для качественного контроля электролитически лужёных плат (рис. 3.3,б) образцы плат сгибают для образования капиллярного пространства. Испытываемые образцы флюсуются при обычной температуре и затем вертикально погружаются в ванну на 1 мин. После удаления и охлаждения образца согнутый край отрезается. Образец выпрямляется, и измеряется высота подъёма припоя. Чувствительность такого качественного испытания низкая, так как он лишь показывает различие в капиллярном подъёме припоя от "хорошего" до "плохого" в интервале 0,2–0,4 см при полном подъёме 3 см.

Измерение капиллярного подъёма припоев выполняют с помощью металлических труб, сгибанием проволок и с помощью внутренних замкнутых пространств (рис. 3.4). В случае согнутых проволок растягивание проволок при погружении в расплавленный припой может вызвать неконтролируемое изменение в размерах капиллярных зазоров.

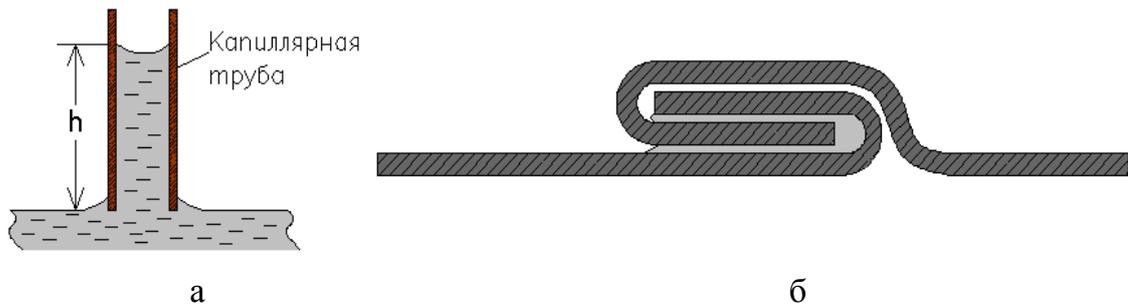


Рис. 3.4. Испытание на проникновение припоя в трубах (а) и в соединении из согнутых проволок (б)

При всех испытаниях на капиллярный подъём, использующих оловянно-свинцовые сплавы, высота подъёма припоя в значительной степени зависит от наличия эвтектики в сплаве припоя, и, чем выше процент эвтектики, тем выше капиллярный подъём.

В методе растекания припоя паяемость оценивают измерением площади растекания массы офлюсованного припоя на образце подложки при температуре, превышающей температуру плавления припоя, и заданном времени. Этот быстрый и простой контроль часто используется для оценки эффективности ряда флюсов для различных комбинаций подложки и припоя. В этом случае, стандартный размер шарика припоя, расположенного на офлюсованной поверхности, помещается на нагреватель или предпочтительно в ванну с расплавленным припоем. Площадь растекания оценивается как качественно, так и количественно.

Вариант контроля площади растекания подходит и для оценки пригодности к пайке выводов компонентов. Окончательная область, смоченная припоем, должна быть меньше чем ширина провода, ограниченная массой припоя, используемого в контроле, несколько десятков мг. Шарик таких размеров сложно подготавливать, обрабатывать и взвешивать, что отрицательно влияет на быстрое выполнение процедуры контроля. Тем не менее, этот вид контроля площади растекания все же применяют для оценки паяемости выводов компонентов.

Если подложка имеет однородный состав по структуре, и если сочетание подложки, флюса и припоя обеспечивает смачивание, то после расплавления припой приобретает вид полусферы, размеры которой определяются как на рис. 3.5. Контур припоя не полностью сферический, так как вершина поверхности выравнивается гравитационной силой, направленной вниз. Этот эффект значительнее, когда интерпретируется крупномасштабный контроль области растекания, и ошибка составляет до 1% от диаметра смачиваемой припоем области. Если масса шарика припоя M и плотность ρ , то объём сферической капли припоя V :

$$V = \frac{M}{\rho} = \frac{1}{6} \pi h (h^2 + 3b^2), \quad (3.15)$$

где h – высота капли, $2b$ – диаметр площади растекания.

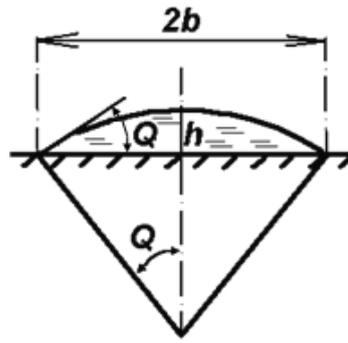


Рис. 3.5. Растекание расплавленной капли припоя

Размеры h и b связаны с контактным углом θ :

$$\frac{h}{b} = \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} \quad (3.16)$$

Комбинируя выражения (3.13) и (3.14) получим [5]:

$$\frac{M}{\rho} = \frac{\pi b^3}{6} \left[\left(\frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} \right) \left\{ \left(\frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} \right) + 3 \right\} \right] \quad (3.17),$$

из которого, для известного размера шарика припоя угол может быть определён из диаметра $2b$ площади растекания. Рассчитанные значения из выражения (3.17), связывающего растекание припоя с контактным углом смачивания для тестируемой поверхности выводов компонентов, показаны на рис. 3.6.

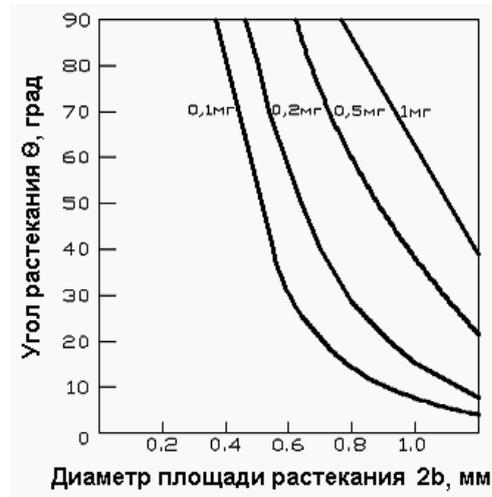


Рис. 3.6 Зависимость контактного угла от диаметра площади растекания и массы припоя

В методах контроля площади растекания используют безразмерный фактор растекания, который выражается, соотношением диаметра площади растекания припоя D и объёма припоя V . В этом случае фактор растекания $S = 2b/D$, где $V = \pi D^3/6$ откуда, приравнивая этот V с выражением (3.14) для сферической капли, фактор растекания может быть вычислен как функция от угла растекания, как показано на рис. 3.7. Другой фактор растекания определяется как $S' = (D-h)/h$, где D и h остаются такими, как и были определены выше. На практике значение

$2b$ может быть измерено на застывшем припое в предположении, что периферия не изменяется во время застывания. Размер h также не может быть измерен сразу, так как вершина будет меняться во время затвердевания и объём припоя сокращается. Изменяемый объём припоя во время кристаллизации составляет около 4%, и далее падает до 1–2% во время охлаждения.

Как правило, на электронных компонентах, площадь растекания не будет округлой, так как имеются неоднородности структуры поверхности. Площадь может быть измерена автоматической системой оптического формирования изображений с помощью компьютера. Классификация смачиваемости по величине контактного угла приведена в табл. 3.5, а класс паяемости по европейскому стандарту NF89400 – в табл. 3.6.

Таблица 3.5. Классификация смачиваемости в зависимости от контактного угла

$0^{\circ} - 10^{\circ}$	идеальная
$10^{\circ} - 20^{\circ}$	отличная
$20^{\circ} - 30^{\circ}$	очень хорошая
$30^{\circ} - 40^{\circ}$	хорошая
$40^{\circ} - 55^{\circ}$	достаточная
$55^{\circ} - 70^{\circ}$	низкая
$70^{\circ} - 90^{\circ}$	очень низкая
$90^{\circ} < \theta$	не смачиваемая

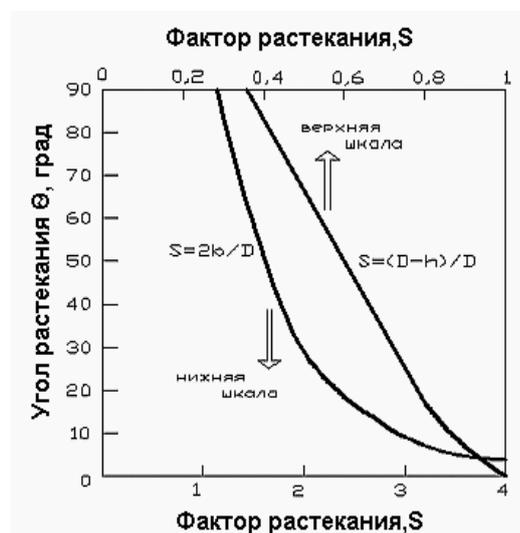


Рис. 3.7. Факторы растекания по площади и углу смачивания

Таблица 3.6. Классификация паяемости в зависимости от контактного угла

Класс паяемости	Качество паяемости	Величина контактного угла
1	отличное	до 30°
2	хорошее	до 40°

3	среднее	до 55^0
4	плохое	$55^0 < \theta$

Для измерения высоты капли припоя при растекании предложен метод бесконтактного измерения с помощью индуктивного преобразователя [3] (рис. 3.8). Для этого применены два индуктивных преобразователя 1 и 2, два высокочастотных генератора 3 и 4, смеситель 5, интегратор 6 и регистрирующий прибор 7. Балансная схема включения генераторов позволяет компенсировать изменение частоты в результате нагрева индуктивных преобразователей и повысить точность измерений. Регистрирующий прибор измеряет разностную частоту, получаемую в смесителе. В осевом отверстии катушки индуктивного преобразователя жестко закреплена игла 8 из материала, смачиваемого припоем 9, для центрирования капли припоя относительно датчика. Длина иглы, устанавливаемой на поверхность образца 10, должна превышать высоту каплей припоя при полной несмачиваемости поверхности.

Припой расплавляется резистивным нагревательным элементом Н, на котором размещаются исследуемые образцы. Контроль температуры осуществляют с помощью термопары типа ХК, погруженной в дозированную навеску припоя на образце-свидетеле, и подключенной к электронному измерителю температуры БКТ, который стабилизирует температуру процесса.

Перед началом испытаний в центре образца наносят навеску припоя массы 250 мг и дозированный объем флюса 0,01 мл.

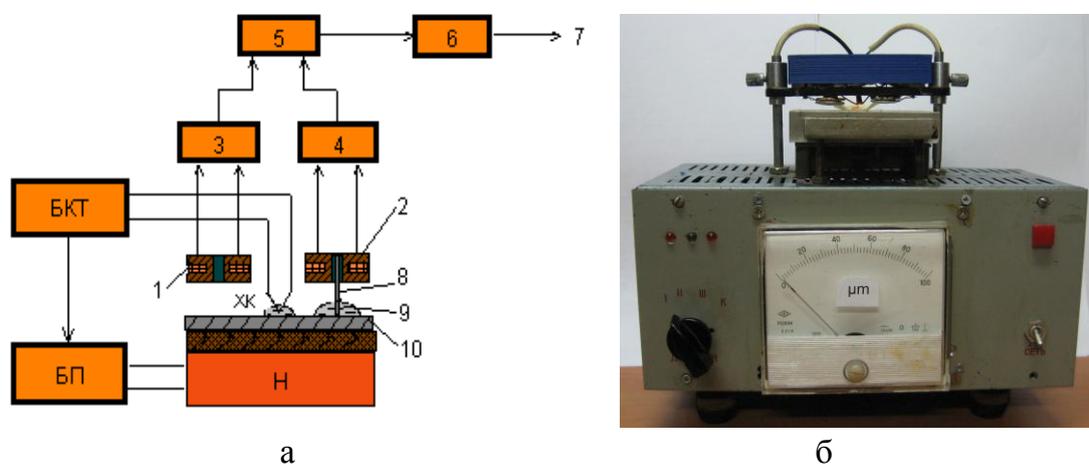


Рис. 3.8. Схема (а) и внешний вид (б) прибора оценки паяемости бесконтактным измерением высоты капли припоя

Индуктивный преобразователь располагают на плоской заготовке припоя так, чтобы игла фиксировала осевую симметрию преобразователя и припоя. Секундомером фиксируют начало и конец растекания припоя, а высоту капли припоя определяют по показаниям прибора (рис. 3.8,б). Для перехода к коэффициенту растекания построена специальная диаграмма.

3.4. Паяемость гальванических покрытий

Основным критерием оценки паяемости гальванических покрытий, рекомендованным отраслевыми стандартами, является коэффициент растекания припоя K_p . Паяемость определяется на образцах-спутниках размером 25x25x1 мм, изготовленных из исследуемого материала с покрытием (рис. 3.9, а). Образцы 1 предварительно обезжириваются в органическом растворителе, твердый припой 3 прокатывается до толщины листа 0,3 мм, доза его в виде диска диаметром 8 мм вырубается с помощью штампа или пробойника. Температура испытаний устанавливается на 65–70°C выше температуры ликвидуса припоя, время испытаний не более 3с. После испытаний микрометром измеряется высота капли 2, площадь растекания рассчитывается по среднему диаметру растекшейся капли припоя. Паяемость считается удовлетворительной, если коэффициент растекания не менее 0,9, а высота капли припоя не более 0,6 мм.

Для определения угла смачивания на образец-спутник 1 укладывают предварительно облуженную в припое ПОС61 медную проволоку диаметром 0,5—0,8 мм и длиной 15—20 мм. На проволоку наносят пипеткой две капли флюса объемом 0,025 мл каждая и включают нагрев. После оплавления слоя припоя на проволоке и образования паяного шва образец снимают с установки и охлаждают. Угол смачивания определяют на срезе образца, перпендикулярном оси (рис. 3.9, б).

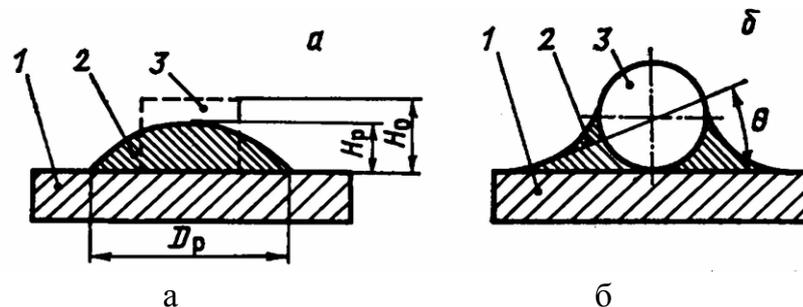


Рис. 3.9. Схема определения коэффициента растекания (а) и угла смачивания (б)

Исследования паяемости покрытий в зависимости от искусственного старения в течение 24 ч в атмосфере насыщенного водяного пара при 100°C и старения в нормальных условиях в течение 6 месяцев показали, что наилучшую паяемость имеет горячее лужение оловом и сплав олово–свинец [8]. Паяемость большинства гальванических покрытий при старении уменьшается в результате образования сульфидных и оксидных пленок под воздействием атмосферы и диффузии металла покрытия в основной металл, что приводит к уменьшению толщины покрытия.

Покрытия из благородных металлов (золота, палладия, родия) характеризуются хорошей паяемостью и устойчивостью в агрессивной атмосфере, однако из-за высокой стоимости этих металлов применяются очень тонкие (1–3 мкм) их слои, которые не предотвращают диффузию металлов из основы, что ухудшает пайку покрытых деталей после продолжительного хранения (например, латун-

ных). Кроме того, тонкое покрытие из благородного металла легко растворяется в расплавленном припое. В связи с этим целесообразно покрытия золотом, платиной, палладием, серебром корпусов и выводов изделий электронной техники заменять покрытиями из менее дефицитных и более дешевых сплавов на основе олова, никеля и других металлов.

Стойкость серебряного покрытия во многом зависит от его пористости. Чем выше пористость, тем быстрее развивается коррозия и образуются сернистые соединения серебра типа Ag_2S . К ускоренной коррозии серебряных покрытий приводит также наличие в атмосфере озона, хлора, сернистых соединений. Для развития процессов коррозии и образования соединения Ag_2S , препятствующего пайке, достаточно 5 мм^3 паров сернистых соединений в кубометре воздуха. Источником серы являются оберточная бумага, картон упаковочных коробок для радиоэлементов, а также клеящий состав липких лент, используемых при машинной установке элементов на плате. При опрессовке элементов из пресс-порошка могут выделяться пары хлористого водорода, хлористого винила и фенола, вступающие в реакцию с гальваническим серебряным покрытием выводов. Линолеумные и поливинилхлоридные покрытия полов в помещениях выделяют серу, хлор и другие летучие вещества.

Качественная пайка деталей, имеющих серебряные покрытия и не прошедших специальной обработки, возможна в присутствии спирто-канифольного флюса не более чем после 10–15 суток складского хранения. Для сохранения паяемости в течение более длительного срока (до 2,5 лет) рекомендуется проводить обработку покрытий в водном растворе ингибитора с упаковкой в конденсаторную бумагу.

Паяемость композитных серебряных покрытий определена по коэффициенту растекания заготовки припоя ПОС 61 массой 250 мг в присутствии спирто-канифольного флюса при температуре $220 \pm 5^\circ\text{C}$. Применяемый флюс содержал по массе 25% канифоли и 75% изопропилового или этилового спирта. Испытанию предшествовало ускоренное старение, которое проводилось при $155 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 16 часов. После проведения ускоренного старения образцы выдерживали в нормальных климатических условиях не менее 2 и не более 24 часов. Результаты показали, что некоторое ухудшение паяемости покрытий серебро-ультрадисперсный алмаз наблюдается лишь при концентрации 15 г/л УДА в электролите. По значению коэффициента растекания больше 80% паяемость композиционных серебряных покрытий можно считать хорошей.

Гальванические покрытия оловом и сплавом олово–свинец сразу после осаждения имеют хорошую паяемость, однако вследствие рыхлой и пористой структуры покрытий в процессе хранения протекает диффузия цинка из латунной основы к поверхности. Поэтому паяемость таких покрытий значительно ухудшается в течение трех месяцев складского хранения. Оловянно-цинковые и оловянно-висмутовые покрытия сохраняют паяемость в течение более длительного времени. Снижение паяемости оловянно-цинкового покрытия на 25% наблюдается через 9 месяцев складского хранения, а у оловянно-висмутового — через три года хранения.

Значения коэффициентов растекания припоя ПОС 61 по площади и по высоте капли приведены в табл. 3.7 [9]. Отличной паяемостью обладают оловянное, золотое, серебряное покрытие, а также покрытия сплавами Sn-Ni, Pd-Ni. Хорошие результаты отмечены для покрытий Pd, Sn-Pb. По никелевым сплавам спиртоканифольные флюсы имеют низкую активность, а также образуют трудно удаляемые остатки на паяемых поверхностях.

Таблица 3.7. Коэффициенты растекания припоя ПОС 61 по покрытиям

Тип покрытия	Состав, %	Коэффициент растекания,	
		по площади	по высоте, %
Оловянное	100 Sn	4,0–5,0	96–97
Золотое	100 Au	3,2–3,5	94–95
Сплав Sn-Bi	3,0 Bi, ост. Sn	3,0–3,2	92–94
Серебряное	100 Ag	1,5–2,0	87–89
Сплав Pd-Ni	1,5 In, ост. Pb	1,4–1,5	87–88
Сплав Sn-Ni	3,5 Ni, ост. Sn	1,4–1,6	92–95
Сплав Sn-Pb	50 Sn, ост. Pb	1,2–1,3	80–83
Палладиевое	100 Pd	1,2	8–82
Медное	100 Cu	1,2	78–80
Никелевое	100 Ni	1,0	70–75

Для увеличения активности по медным и никелевым поверхностям необходимо использовать активированные флюсы на основе этиленгликоля, содержащие поверхностно-активные вещества и активаторы в виде щавелевой кислоты и гидрохлоридов производных бензиламина. Такие флюсы обладают в 1,6–2,0 большей активностью, чем флюс ФКСп, а его остатки легко удаляются с поверхности деталей промывкой в теплой проточной воде.

Исследования паяемости различных типов покрытий печатных плат [10], в зависимости от их старения в условиях воздействия влаги и атмосферы с сернистыми соединениями, приведены в табл. 3.8. Наилучшие результаты отмечены для гальванических покрытий оловом и сплавом олово–никель толщиной 20–30 мкм. Оплавлением свежесажженных гальванических покрытий, например, с помощью ИК излучения можно значительно улучшить паяемость и увеличить стойкость к окислению. При этом совершенствуется структура покрытия, которая по своим свойствам приближается к структуре металлургического сплава.

Результаты исследований смачивания металлических покрытий на меди М1 припоем ПОС 61 в присутствии флюса ФГСп при температуре 230 ± 10 °С тензометрическим методом приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.8. Параметры смачивания и растекания припоя для покрытий плат

Покрытие	Время смачивания, с		Площадь растекания, см ²	
	Среда SO ₂	Среда H ₂ S	Среда SO ₂	Среда H ₂ S
Олово	<0,2	0,2	>5	>5
Олово–свинец	<0,2	<0,2	>5	>5

Химическое олово	>10	>10	0	0,4
Золото	<0,2	<0,2	0,7	0,6
Химическое золото	>10	>10	0,3	0
Серебро + золото	10	0,4–1,0	0,7	0,6
Олово–никель–золото	0,3	0,2	0,6	0,7
Олово–никель	>10	13	–	–
Олово–никель +никель	1,0	0,24	–	–

– не исследовано

Таблица 3.9. Параметры смачивания покрытий для пайки

Покрытие	$F_o \cdot 10^{-3}$, Н/м	θ , град	Время смачивания, с
Гальванический никель	2,80	54	0,12
Химический никель	2,60	58	0,14
Гальванический никель с блескообразующими добавками	2,40	60	0,23

Лучше всего смачиваются гальванические никелевые покрытия, наличие до 3% фосфора в химическом покрытии, а также его пористость, замедляют смачивание и увеличивают угол смачивания до 58–60 град. Хуже всего смачивается гальваническое покрытие с блескообразующими добавками с высокой чистотой поверхности, в результате чего увеличивается время релаксации смачивания и угол смачивания до 60 град.

Одним из перспективных направлений улучшения качества функциональных гальванических покрытий является осаждение их на периодическом токе, что позволяет оперативно управлять технологией формирования толщины покрытия, снизить количество включаемых примесей и пор, повысить плотность и износостойкость покрытий. Главными особенностями импульсного электролиза являются:

- высокие мгновенные плотности тока, которые ускоряют кинетику осаждения и способствуют росту зародышеобразования ядер;
- наличие времени выключения тока положительно влияет на протекание процессов адсорбции и десорбции, а также рекристаллизации осадка.

Новые возможности формирования функциональных свойств гальванических покрытий дают методы нестационарного электролиза: чередование импульсного, реверсного и асимметричного переменного тока [11], что позволяет при высокой производительности процесса электролиза получать покрытия с мелкозернистой структурой, повышенной износо- и коррозионной стойкостью при малой толщине и хорошую паяемость покрытий.

3.5. Паяемость электронных компонентов

Наиболее часто встречающийся дефект при выходном контроле электронных модулей – это неудовлетворительное качество паяных соединений внешних выводов по критерию увеличенного содержания пустот (более 25% по IPC–A–610–D). Основной причиной этого дефекта является неудовлетворительная паяемость выводов компонента. Технические условия испытаний на паяемость в международной практике регламентируют стандарты IPC j-STD 002/003, в которых используется метод погружения выводов в расплавленный припой и критерий приемки – 95% площади, смоченной припоем [12].

В отечественной электронной промышленности применяют испытания на паяемость по методу 402-1 ГОСТ 20.57.406—81 погружением в расплав и ускоренным старением изделий следующими методами воздействия:

- водяного пара в течение 4 ч;
- повышенной влажности в течение 10 суток при температуре $(40\pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(93\pm 3)\%$;
- повышенной температуры 155°C в течение 16 ч.

После ускоренного старения изделия выдерживают в нормальных климатических условиях не менее 2 ч, а затем испытывают выходы погружением в паяльную ванну с расплавом припоя ПОС 61 при 235°C и нанесением спиртоканифольного флюса.

Для определения паяемости выводов компонентов иногда применяют более простой менискометрический метод, заключающийся в измерении высоты мениска припоя, поднявшегося по выводу над зеркалом ванны под действием сил поверхностного натяжения. Высоту мениска над зеркалом припоя измеряют с помощью специальной оптической головки или бинокулярного микроскопа. Высота мениска обратно пропорциональна контактному углу смачивания. Чем больше высота мениска, тем лучше смачивание. Это следует из формулы [13]:

$$\sin \theta = 1 - \frac{g(\rho - \rho_{\text{ф}}) \cdot H^2}{F_{\text{жф}}}, \quad (3.18)$$

где $\rho_{\text{ф}}$ – плотность флюса; H – высота мениска припоя на выводе, $F_{\text{жф}}$ – сила, действующая на границе жидкий припой–флюс; θ – угол смачивания.

Для измерения высоты мениска применяют установку, состоящую из миниатюрной ванны с припоем, сменных держателей для закрепления компонентов, микроскопа для замера высоты мениска, щупа для настройки микроскопа на уровень припоя и пульта управления. Ванну с припоем ПОС 61 разогревают до температуры $240\text{--}250^\circ\text{C}$, время выдержки вывода в припое 2–3 с в зависимости от диаметра вывода. Микроскоп устанавливают так, чтобы нулевая линия шкалы микроскопа располагалась между концом щупа и его изображением в зеркале припоя. После этого щуп удаляют и закрепляют в держателе компонент, выводы которого перед испытанием рихтуют, обезжиривают растворителем и сушат. По достижении рабочей температуры в ванне включают электродвига-

тель перемещения держателя и, наблюдая в микроскоп за мениском припоя на выводе, определяют по шкале микроскопа его высоту, по которой судят о паяемости (табл. 3.10).

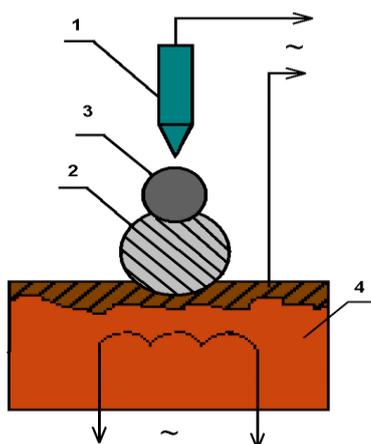
Таблица 3.10. Оценка паяемости по высоте мениска припоя

Высота мениска припоя, мм	Оценка паяемость
0,95—0,65	Хорошая
0,55—0,40	Удовлетворительная
Менее 0,40	Неудовлетворительная

Менискометры фирмы Metronelec (Швейцария) обеспечивают диапазон измерения высоты подъема мениска 0–1,5 мм с погрешностью $\pm 0,05$ мм. Производительность контроля - до 30 шт/час. Оценка паяемости выводов по высоте мениска трудоемка и имеет значительную погрешность.

Для проверки на паяемость выводов электронных компонентов по времени смачивания используют метод шарика припоя (glob test) (рис. 3.11, а). На нагретый столик 4 укладывают дозу припоя, которая расплавляясь, образует каплю 2. К капле подводят вывод 3, который делит ее на две части. По мере нагрева вывода припой начинает его смачивать и обтекать. В момент полного смыкания над выводом припоя касается зонда 1 и отсчет времени прекращается. Такие приборы выпускаются фирмой Multicore (Англия) и Wazau (Германия) (рис. 3.11, б).

Для контроля паяемости металлизированных отверстий в печатных и многослойных платах измеряют время заполнения их припоем с помощью таймера, связанного с зондом (рис. 3.12, а). Для этого плату 1 приводят в контакт с припоем 3, при этом включается таймер. Постепенно поднимаясь по стенкам отверстий и смачивая их за счет капиллярного эффекта, припой касается зонда 4 и отключает тем самым таймер. Для этих целей фирма Multicore выпускает универсальный прибор со сменной головкой на различные диаметры в платах, снабженный принтером и стандартным интерфейсом. Производительность контроля составляет до 150 отверстий в час. При времени смачивания более 3 с паяемость отверстий считается неудовлетворительной.



а б
Рис. 3.11. Схема метода (а) и устройство (б) контроля времени смачивания выводов компонентов

Устройство контроля паяемости ГГМЗ.449.004 (ЛПО "Авангард") (рис. 3.12,б) имело три сменных контактных колпачка для контроля отверстий диаметром 0,6-1,0; 1,1-1,5; 1,6-2,0 мм. Производительность контроля составляла до 150 отверстий в час. При температуре испытаний 260–270°С и времени смачивания более 3 с паяемость отверстий считается неудовлетворительной. Оценка паяемости давалась исходя из времени смачивания и толщины платы (табл. 3.10). При оценке паяемости учитывалось, что сроки ее сохранения зависели от типа гальванического покрытия и консервации платы. Так, для покрытия горячим лужением ПОС 61 срок сохранения паяемости составлял 6 месяцев, а с консервацией платы – 12 месяцев.

Для контроля паяемости выводов широкого круга корпусов компонентов: от 0402 до БИС в корпусах QFR и BGA на этапе входного контроля в соответствии с требованиями стандартов: IPC j-ST-002/003, IEC 68-2-69 и MIL-STD-883C применяют тестер контроля паяемости Menisco ST88 (рис. 3.13), который обладает высокой точностью перемещения образца (0,1%), регулируемой скоростью 1–50 мм/с, поддерживает температуру до 450°С и обеспечивает погружение образцов в припой на глубину от 0,02 до 25 мм.

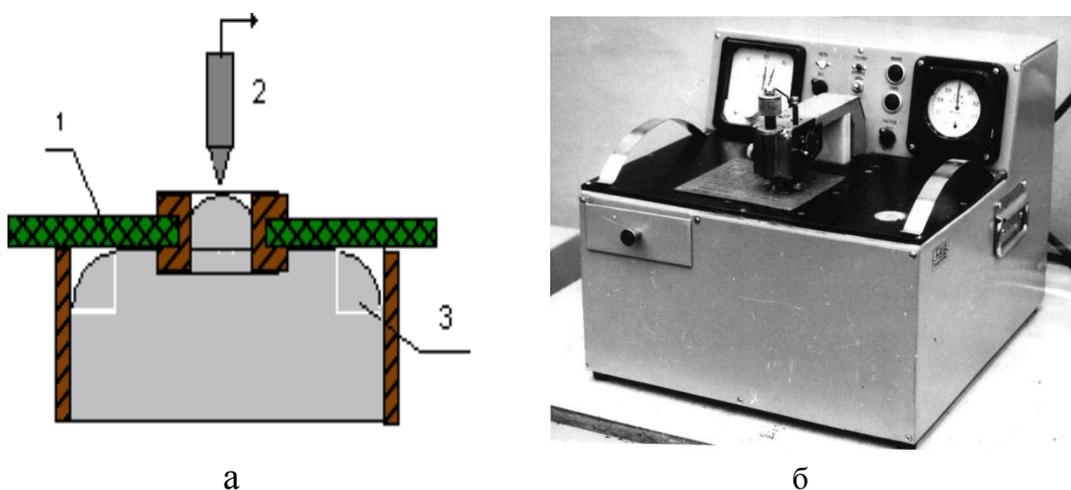


Рис. 3.12. Схема метода (а) и устройство (б) контроля паяемости металлизированных отверстий в платах

Таблица 3.10. Оценка паяемости металлизированных отверстий в платах

Толщина платы, мм	Время смачивания, с	Паяемость
0,8 – 1,0	1,0 – 1,5	Хорошая
	1,6 – 2,0	Удовлетворительная
	>2,0	Неудовлетворительная

1,5	до 2,0	Хорошая
	2,1 – 3,0	Удовлетворительная
	>3,0	Неудовлетворительная
2,0	до 3,0	Хорошая
	3,1 – 4,0	Удовлетворительная
	>4,0	Неудовлетворительная
2,5 – 3,0	до 4,0	Хорошая
	4,1 – 5,0	Удовлетворительная
	>5,0	Неудовлетворительная

Значения параметров смачивания оловянно–свинцовым припоем для различных типов покрытий приведены в табл. 3.11 [13].

Лучше всего смачиваются припоем оловянные химические и матовые покрытия. Гальванические блестящие покрытия отличаются высокой чистотой поверхности, что значительно увеличивается время релаксации смачивания. Наличие до 3% фосфора в никелевом химическом покрытии, а также его пористость обуславливает некоторое замедление смачивания и увеличение краевого угла до 58° [14]. Хорошей паяемостью обладают золотое, серебряное покрытие, а также покрытия Pd, Sn-Pb и Au-Cu. По никелевым сплавам спиртоканифольные флюсы имеют низкую активность, а также образуют трудно удаляемые остатки на паяемых поверхностях. Для увеличения активности по медным и никелевым поверхностям необходимо использовать активированные флюсы на основе этиленгликоля, содержащие поверхностно–активные вещества и активаторы в виде щавелевой кислоты и гидрохлоридов производных бензиламина. Такие флюсы обладают в 1,6–2,0 большей активностью, чем ФКСп, а его остатки легко удаляются с поверхности деталей промывкой в теплой проточной воде.

Параметры смачивания безвыводных электронных компонентов поверхностного монтажа, а именно их контактных площадок, оцененные менискографическим методом, зависят от типа барьерного слоя и качества слоя лужения. Время смачивания находится в пределах 0,5–2,0 с, а натяжение смачивания– в пределах 400–440 мН/ м [15].



Рис. 3.13. Тестер контроля паяемости Menisco ST88

Таблица 3.11. Параметры смачивания покрытий Sn–Pb припоем

Покрытие (медный подслоя)	Натяжение смачивания, мН/м
Золото 99,99	270
Золото–олово(80)	140
Золото–серебро (68)	200
Золото–медь (70)	400
Палладий	450
Родий	100
Олово химическое	480
Олово электрохимическое матовое	480
Олово электрохимическое блестящее	270
Никель химический	260
Никель гальванический	280
Никель гальванический блестящий	240
Никель–фосфор(90)	200
Никель–бор	150
Олово–никель(70)	60
Олово–свинец (60)	480

Переход на бессвинцовые припои при монтаже электронных модулей ставит ряд задач по обеспечению хорошей смачиваемости поверхностей, оптимизации температурных профилей нагрева, контролю качества соединений. Обеспечение этих требований невозможно без разработки высокоэффективных и производительных методов контроля, особое место среди которых занимают методы контроля паяемости [16]. Существенным отличием свинцовых и бессвинцовых сплавов является их время смачиваемости (табл. 3.12) [17]. Время смачиваемости сплава Sn-Pb-Ag при температуре 245°C составляет 8 мс. При увеличении температуры на 15°C время смачиваемости уменьшится всего до 7 мс. Время смачиваемости SAC при температуре 245°C составляет 460 мс, а при температуре 260 °C оно резко уменьшается до 10 мс. Более длительное время смачиваемости требует более длительного и интенсивного нагрева, что увеличивает энергозатраты. Необходимо использовать более мощные печи с двумя зонами пикового нагрева.

Таблица 3.12. Параметры смачиваемости оловянных сплавов

Тип сплава	Sn-Pb-Ag		Sn-Ag-Cu		Sn-Ag	
Температура плавления, °C	179		217		221	
Температура в печи, °C	245	260	245	260	245	260
Натяжение смачивания, мН/м	311	304	315	319	307	345
Время смачивания, мс	8	7	460*	10	720*	124*

*Большие энергозатраты на нагрев из-за длительности смачивания

Исследования параметров смачивания наиболее распространенными бессвинцовыми припоями: Sn-3,4Ag-4,8Bi, Sn-4,0Ag-0,5Cu, Sn-3,5-Ag и Sn-0,7Cu

поверхностей печатных плат показало, что на свежеприготовленных образцах сила смачивания составляет 4,7–5,2 мН, а время смачивания–2–3 с. После 2-х циклов нагрева в связи с ростом оксидной пленки SnO₂ сила смачивания снижается до 2 мН, в время смачивания растет до 8–10 с [17]. Сравнение параметров смачивания оловянными припоями различных финишных покрытий печатных плат: лужение, химический Ni–золочение, серебрение и органическое паяемое покрытие (OSP) приведено в табл. 3.13.

Таблица 3.13. Сравнение параметров смачивания оловянными припоями покрытий печатных плат

Припой	Максимальная сила смачивания, мН	Время смачивания, с
Sn37Pb	Sn>Ag=OSP>NiAu*	Sn=Ag=OSP=NiAu
Sn3,4Ag4,8Bi	Sn>Ag>NiAu>OSP	Sn=Ag=NiAu>OSP
Sn3,8Ag0,7Cu	Ag>NiAu>Sn>OSP	Sn>NiAu>Ag>OSP
Sn3,5Ag	Ag>NiAu>Sn>OSP	Ag=NiAu=Sn>OSP
Sn0,7Cu	Sn>NiAu>Ag>OSP	NiAu>Sn=Ag>OSP

* Лучше>хуже

В бессвинцовом процессе флюс должен обеспечить смачиваемость наиболее трудно смачиваемых припоев и металлических поверхностей контактных площадок и компонентов, при более высокой температуре, поэтому его активность должна быть выше. Более активный флюс уменьшает число оксидов и улучшает смачиваемость. Для улучшения смачивания бессвинцовыми припоями рекомендуется 10%-ный перегрев выше точки плавления припоя [18].

После герметизации полупроводниковых приборов и ИС пресс – материалами на основе фенольных, эпоксидных либо кремнийорганических смол на внешних выводах остается тонкий слой пластмассы, называемый облоем [19]. Удаление облоя с выводов полупроводниковых приборов необходимо для улучшения смачиваемости их припоем при лужении и повышению надежности паяного соединения. электрохимическое обезжиривание только на катоде в течение 7-10 мин с последующей зачисткой облоя и травлением является эффективным способом подготовки деталей к лужению [20]. При этом качество горячего лужения соответствует техническим требованиям и обеспечивает хорошую паяемость выводов ИС.

Список литературы к главе 3

1. Петрунин И.Е. Физико-химические процессы при пайке. – М.: Высш. школа, 1972. – 280 с.
2. Manko Н.Н. Solders and Soldering: Materials, design, production and analysis for reliable bonding. N.Y., 2000. – 719 p.
3. Ланин В.Л., Хмыль А.А. Контроль паяемости выводов элементов радиоэлектронной аппаратуры // Неразрушающий контроль и системы управления ка-

- чеством сварных и паяных соединений. Материалы семинара. М.: ЦРДЗ, 1992. – С. 140–143.
4. Ланин В.Л. Оценка паяемости электронных компонентов и деталей в электронике // Компоненты и технологии. – 2008. – № 2. – С. 74–79.
 5. Wassink K.R.J. Soldering in Electronics. – Ayr, Scotland: Electrochem. Publ., 2002. – 285 p.
 6. Бородин Е.К., Крашенников М.Г. Контроль паяемости металлических покрытий // Заводская лаборатория. 1989. – Т. 53. – № 11. – С. 80–82.
 7. Harding W.B. Solderability Testing // Plating. – 1965. – № 10. – P. 970–981.
 8. Rothschild B.F. Electroplating of Solderable Coatings // Metal Progress. – 1981. – V. 119. – № 7. – P. 25–29.
 9. Хмыль А.А., Ланин В.Л., Емельянов В.А. Сравнительная эффективность гальванических покрытий корпусов интегральных схем и микросборок. – Минск: БелНИИТИ, 1983. – 47 с.
 10. Thwaites C.J. Solderability of Coating for Printed Circuits // Trans. of the Inst. of Metal Finishing. – 1965. – V. 43. – P. 143–152.
 11. Композиционные гальванические покрытия на основе серебра для изделий электроники / И. Кузьмар, В. Ланин, Н. Пась, А. Хмыль // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – № 6. – С. 58–60.
 12. Печатные платы: Справочник / Под ред. К.Ф. Кумбза. Книга 2, М.: Техносфера, 2011. – 1016 с.
 13. Городецкая М.С., Казаков Н.И. Метод оценки паяемости выводов электрорадиоэлементов и микросхем // Обмен опытом в радиопромышленности. 1982. Вып. 11. – С. 21–22.
 14. Груев И.Д., Матвеев Н.И., Сергеева Н.Г. Электрохимические покрытия изделий радиоэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
 15. Оценка паяемости гальванических покрытий токопроводящих элементов электронной аппаратуры / В.А. Емельянов, В.Л. Ланин, Л.К. Кушнер, А.А. Хмыль // Электронная техника. Сер 7. 1990. Вып. 3(160). – С. 68–71.
 16. Becker G. Solderability Testing of Surface-Mount Devices // Electronic Packaging and Production. 1987. – V. 27. – № 10. – P. 32–35.
 17. Ланин В.Л. Паяемость выводов электронных компонентов // Технологии в электронной промышленности. 2010. – № 4. – С. 58–63.
 18. Wetting Characteristics of Pb-Free Solder Alloys and PWB Finishes / S.V. Sattiraju, B. Dang, R.W. Johnson, Y. Li, J.S. Smith, M.J. Bozack // IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing. 2002. – Vol. 25. – № 3. – P. 168–184.
 19. Новотник М., Новиков А. Паяемость бессвинцовых припоев // Технологии в электронной промышленности, 2006. – № 6. – С. 61–63.
 20. Ланин В.Л., Керенцев А.Ф. Дефекты паяных соединений при монтаже внешних выводов транзисторов в силовых модулях // Технологии в электронной промышленности, 2010. – № 3. – С. 58–63.

21. Улучшение паяемости внешних выводов интегральных микросхем в корпусе DIP / А. С. Турцевич, В.Л. Ланин, Я.А. Соловьев, А.Ф. Керенцев // Технологии в электронной промышленности. 2011. – № 7.– С. 22–25.

1. Yasuda T. Bedeutung der Weichlotmenge für den Benetzungsversuch, Schwess. und Schneid. 1977. V. 29. № 12. S. 490–491

ГЛАВА 4

ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМОНТАЖНОЙ ПАЙКИ

4.1. Подготовка поверхностей к пайке

Пайка – это процесс соединения материалов в твердом состоянии посредством введения в зазор легкоплавкого металла — припоя, взаимодействующего с основными материалами и образующего жидкую металлическую прослойку, кристаллизация которой приводит к образованию паяного шва. Из определения следует, что пайка происходит при температурах, существенно меньших температур плавления соединяемых материалов, что уменьшает их перегрев; возможно соединение как металлических, так и неметаллических материалов; в зоне контакта должен образовываться промежуточный слой, состоящий из припоя и продуктов его взаимодействия с паяемыми материалами.

Для образования качественного паяного соединения необходимо: подготовить поверхности соединяемых материалов; активировать материалы и припой; удалить оксидные пленки в зоне контакта; обеспечить взаимодействие на межфазной границе раздела; создать условия для кристаллизации жидкой металлической прослойки.

Подготовка поверхностей деталей к пайке включает механическую, химическую или электрохимическую очистки от оксидов, загрязнений органического и

минерального происхождения, а также нанесение покрытий, улучшающих условия пайки или повышающих прочность и коррозионную стойкость паяных соединений.

Удаление продуктов коррозии и оксидных пленок механическим способом производят с помощью режущего инструмента (напильника, шлифовального круга, шабера), а также наждачной бумаги, проволочной сетки. Для повышения производительности при обработке протяженных или сложно профилированных изделий применяют гидроабразивную очистку с помощью струи жидкости или вращающихся щеток из синтетического материала с добавлением в моющий состав абразивных частиц. Образование шероховатой поверхности после механической обработки способствует увеличению растекания припоя, так как риски на поверхности являются мельчайшими капиллярами.

Удаление поверхностных пленок, препятствующих смачиванию расплавленным припоем, осуществляется как химическими, так и электрохимическими способами. Химическое обезжиривание деталей проводят в 5 %-м растворе щелочи или в органических растворителях (ацетон, бензин, спирт, четыреххлористый углерод), спиртобензиновых и спиртофреоновых смесях путем протирки, погружения, распыления, обработки в паровой фазе или ультразвуковой ванне.

Ультразвуковое (УЗ) обезжиривание выполняют в специальных ваннах проточного и непроточного типа, дно и стенки которых совершают механические колебания УЗ частоты (рис. 4.1). Для УЗ обезжиривания используют ванны УЗВ-0,1, УЗВ-0,25, УЗВ-0,4, работающие на частотах 18—22 кГц в докавитационном режиме, который обеспечивает получение интенсивных микропотоков в моющей жидкости, что гарантирует высокое качество очистки и ускоряет процесс в 5–10 раз. Эффективность очистки зависит от частоты и мощности УЗ колебаний, температуры и времени обработки, а также от состава раствора и степени загрязнений.

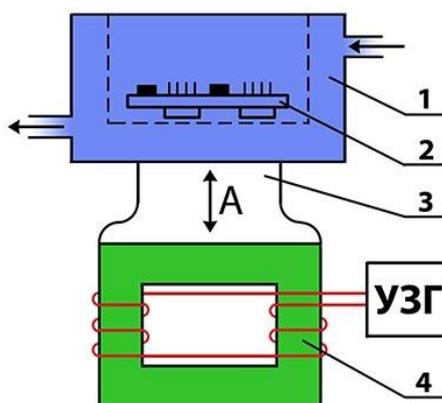


Рис. 4.1. Схема УЗ очистки в проточном растворе: 1–ванна, 2–модуль, 3–концентратор, 4–магнитострикционный преобразователь

Повышение частоты увеличивает проникающую способность раствора за счет уменьшения длины волны УЗ колебаний и снижает вероятность повреждения электронных компонентов. Повышение температуры до 50–60°C повышает растворимость загрязнений и усиливает действие кавитации.

Толстые слои оксидных пленок удаляют травлением в растворах кислот или щелочей. Состав раствора определяется видом металла, толщиной оксидной пленки и требуемой скоростью травления. Электрохимическое травление ускоряет процесс растворения оксидных пленок и проводится при плотности тока 2–5 А/дм². После травления детали тщательно промывают в нейтрализующих растворах.

Очищенные детали необходимо немедленно направлять на сборку и пайку, так как паяемость меди сохраняется 3–5 сут, а серебра 10–15 сут. Поэтому для обеспечения межоперационного хранения деталей и компонентов на их поверхности наносят металлические покрытия, которые улучшают процесс смачивания припоем и сохраняют паяемость в течение длительного времени. В качестве таких покрытий используют легкоплавкие припои (ПОС 61, ПОСВ 33 и др.), сплавы олова с висмутом или никелем, золото, серебро, палладий и другие металлы, которые наносят погружением в расплав, гальваническим или термовакуумным осаждением, а также плакированием. При первом методе погружение производят в расплавы припоев после предварительного флюсования. Гальванические покрытия благородными металлами наносят толщиной 3–6 мкм, остальными — 6–9 мкм. Пленки, полученные термовакуумным осаждением, отличаются высокой равномерностью, отсутствием окисления покрытия, однако имеют малую толщину (0,1–1,0 мкм). Плакирование осуществляется совместной прокаткой паяемого металла и металла покрытия; при этом обеспечивается равномерная толщина покрытия (100–150 мкм). После выполнения подготовительных операций или межоперационного хранения контролируют паяемость деталей.

Активация паяемых поверхностей необходима для физико-химического взаимодействия атомов основного металла и припоя. При этом с поверхности взаимодействующих металлов должны быть удалены оксидные пленки, а атомы должны достичь требуемого уровня энергии активации. При температуре пайки, когда все атомы возбуждены, скорость реакции взаимодействия равна [1]:

$$\frac{dN}{dT} = (N_o - N) \gamma e^{-Q/(k T_n)}, \quad (4.1)$$

где N_o – число контактирующих атомов на поверхности основного металла; N – число атомов, вступивших в химическую связь; γ – частота собственных колебаний атомов (для металлов $1 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$); Q – энергия активации для образования химической связи; k – постоянная Больцмана ($1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$); T_n – температура пайки, К.

Проинтегрировав последнее уравнение при $T_n = \text{const}$, и следующих начальных и конечных условиях: $t = 0, N = 0, t = t_n, N = N_n$, получим время пайки, в течение которого прореагирует N_n атомов металла:

$$t_n = -\frac{1}{\gamma} \ln \left(1 - \frac{N_n}{N_o} \right) e^{-(Q/(k T_n))}. \quad (4.2)$$

Следовательно, тепловая энергия активации Q оказывает решающее влияние на скорость взаимодействия атомов основного металла и припоя.

В обычном состоянии поверхность металлов покрыта оксидными пленками. Нагрев основного металла и расплавленного припоя приводит к тому, что их активность снижается вследствие взаимодействия с кислородом воздуха и ростом оксидных пленок на поверхности. Удаление оксидных пленок в процессе пайки является необходимым условием получения качественных паяных соединений. Оксидные пленки удаляют воздействием газовых сред, флюсованием, ультразвуковой обработкой, механическим или плазмохимическим методом.

При нагреве металлов в активных (восстановительных) газовых средах, в качестве которых используют азотно-водородную смесь. Недостатком такого процесса является взаимодействие водорода с расплавленным припоем, что приводит в ряде случаев к появлению водородной хрупкости, образованию пор, трещин и других дефектов.

Сухие методы очистки: ионное, ионно–плазменное и плазмохимическое травление позволяют прецизионно обрабатывать паяемые поверхности в вакууме, удалять не только загрязнения, но и адсорбированные газы. Ионное травление выполняют путем бомбардировки поверхности ускоренными положительными ионами инертных газов, которые передают кинетическую энергию поверхностным атомам. Распыление поверхностных атомов происходит в том случае, если их энергия превышает энергию межатомного взаимодействия в паяемом материале. Воздействие ионного луча на поверхность металла приводит к испарению оксидной пленки в зоне обработки. Коэффициент распыления K_p зависит от массы материала m_1 , массы ионов m_2 , энергии E , угла падения ионного пучка θ , а также от физического состояния поверхности [2]:

$$K_p = km_1m_2E / [\lambda(m_1 + m_2)], \quad (4.3)$$

где k – коэффициент, характеризующий состояние поверхности, λ – средняя длина свободного пробега иона.

При энергии ионов аргона 1 кэВ коэффициент распыления кремния составляет 0,6–0,8, арсенида галлия–1,25. Недостатком ионного травления является низкая скорость травления (0,1–1,0 нм/с), значительное тепловое воздействие на обрабатываемую поверхность.

При плазмохимическом травлении используют энергию потока ускоренных ионов активных газов, получаемых в вакууме при ионно-плазменном или магнетронном распылении. Присутствие в плазме атомарного кислорода способствует эффективной очистке поверхности от органических загрязнений и повышает скорость травления. Поскольку энергия ионов не превышает 100 эВ, то физическое распыление поверхностного слоя отсутствует. Недостатком является высокая избирательность травления, обусловленная химическим механизмом, сложность управления большим числом технологических параметров.

В настоящее время **системы плазмохимической очистки встраивают в установки пайки**. В качестве газа используют смесь аргона и водорода (40% к 60%), которая подается вакуумную камеру с очень малым расходом –до 30 см³/мин. Плазма возбуждается с помощью магнетрона с частотой 2,45 ГГц и мощно-

стью от 200 до 800 Вт. Плазменная очистка ионизированным газом позволяет очень качественно подготовить поверхности к пайке за счет микровыравнивания контактных поверхностей и удаления оксидных пленок. Плазменная очистка применяется для электронных модулей, где неприемлемо применение флюса. Кроме того такая очистка не повреждает уже установленные компоненты.

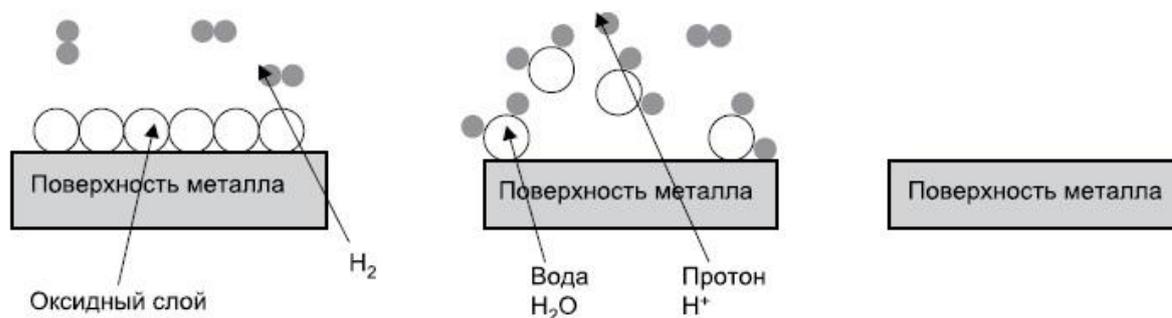


Рис. 4.2. Удаление загрязнений с помощью плазмы

В зависимости от длины свободного пробега частиц, определяемого давлением в рабочей камере, плазма может быть физической или химической. Для физической плазмы основным механизмом очистки является разрушение связи загрязнителей с поверхностью за счет **кинетической энергии частиц** рабочего газа. При химической плазме давление в камере выше, свободный пробег частиц меньше, и преимущественное значение имеют химические реакции: свободные заряды вступают в химическую реакцию с загрязнителями на поверхности обрабатываемых изделий, образуя летучие побочные продукты, которые удаляются из объема камеры вместе с рабочим газом. В этих целях используются плазмохимические реакции с применением смеси Ar/H₂ [3]:



На практике граничным значением давления, разделяющим физическую и химическую плазму, принято считать величину порядка **0,1 мбар**.

Установка вакуумной пайки VS320 компании Budatec (Германия) предназначена для высококачественной бездефектной бесфлюсовой вакуумной пайки и пайки в специальной атмосфере (технологическом газе или вакууме) полупроводниковых устройств, силовых приборов и других изделий микроэлектроники. Благодаря вертикальной компоновке занимает мало места. Скорость нагрева составляет максимально 120 К/мин, а скорость охлаждения может достигать максимально 180 К/мин. Водяное охлаждение нагревательной панели в цикле охлаждения позволяет производить быстрое охлаждение в вакууме (рис. 4.3).

Внутри вакуумной камеры системы в зависимости от конструкции могут содержаться следующие газовые атмосферы: вакуум, азот, водород - защитный газ с максимальным содержанием водорода 5%, азот (или другой инертный газ),

обогащенный муравьиной кислотой - смесь двух газов в произвольной пропорции (например, азот и водород) [4].



Рис. 4.3. Установка вакуумной пайки VS320

Вакуум используется в установке два раза: сразу после помещения изделия в камеру и удаления воздуха, затем в фазе оплавления для удаления пустот и воздушных включений из паяных соединений. Для повышения качества паяного соединения используют специальную атмосферу в камере.

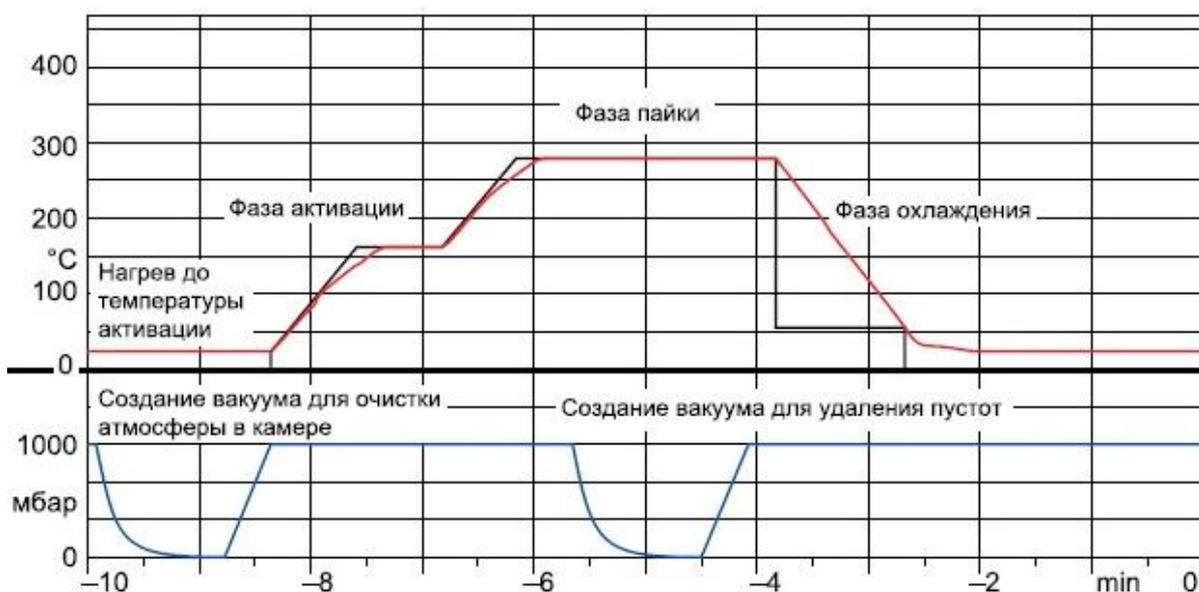


Рис. 4.4. Термопрофиль вакуумной пайки

4.2. Удаление оксидных пленок с паяемых поверхностей

В обычном состоянии поверхность металлов покрыта оксидными пленками. Нагрев основного металла и расплавленного припоя приводит к тому, что их активность снижается вследствие взаимодействия с кислородом воздуха и ростом оксидных пленок на поверхности, удаление которых является необходимым условием для получения качественных паяных соединений. Классификация способов удаления оксидных пленок приведена на рис. 4.5.

Константа равновесия реакции окисления металла Kp зависит от давления паров кислорода в окружающей среде при данной температуре [1]:

$$Kp = \frac{P^{n_{me}} \cdot P^{m_{O_2}}}{P^{m_{meO_2}}}, \quad (4.4)$$

где P_{me} , P_{O_2} , P_{meO_2} – давление паров металла, кислорода и оксида соответственно.

Уменьшая парциальное давление кислорода и увеличивая температуру среды, можно сместить равновесие реакции в сторону разложения (диссоциации) оксида. Однако полное разложение оксидов металла (например, олова, меди) происходит при очень низком давлении (10^{-6} – 10^{-8} Па) и температуре 600–700°C. При пайке металлов в активных газовых средах удаление оксидной пленки с поверхности основного металла и припоя происходит в результате восстановления оксидов активными компонентами газовых сред, в качестве которых используют водород или окись углерода.

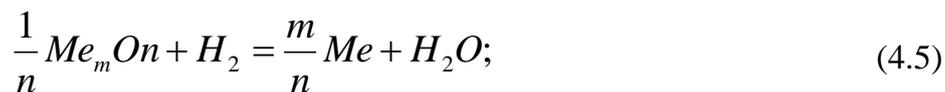


Рис. 4.5. Классификация способов удаления оксидных пленок

Однако при этом неизбежно взаимодействие металлов с компонентами газовых сред, а также с примесями в них кислорода и паров воды. В процессе пайки наиболее вредное воздействие на расплавленный припой оказывает водород, поскольку взаимодействие его с расплавом припоя протекает наиболее активно.

Наличие водорода в паяном шве может привести к появлению водородной хрупкости, образованию трещин, пор и других дефектов. Ряд металлов, таких, как свинец, кадмий, олово, титан, цирконий, образуют при пайке в восстановительной среде гидриды, поэтому пайка их в водородной среде нецелесообразна.

При нагреве металлов в активных (восстановительных) газовых средах, в качестве которых используют азотно-водородную смесь или добавку окиси углерода, происходит восстановление оксидов металлов активными компонентами газовых сред по реакциям:



Недостатком такого процесса является взаимодействие водорода с расплавленным припоем, что приводит в ряде случаев к появлению водородной хрупкости, образованию пор, трещин и других дефектов. Восстановительные свойства этих газов определяются концентрацией водорода или окиси углерода, а также степенью очистки газов от паров воды, углекислого газа, кислорода и других примесей.

Сущность механического способа удаления оксидных пленок с поверхности паяемого металла заключается в их разрушении под слоем жидкого припоя с помощью режущего инструмента или абразивного материала, при этом припой защищает паяемую поверхность металла от воздействия кислорода и вступает с ней в физический контакт. В качестве режущего и абразивного инструмента используют металлические щетки, сетки, пемзу, в качестве абразивных материалов – металлические порошки, асбест, вводимые в припой в мелкоизмельченном виде. Абразивные порошки должны иметь меньшую плотность по сравнению с припоем для всплывания на поверхность.

При механическом удалении оксидных пленок используют также припои с широким температурным интервалом плавления, например оловянно-цинковые (4–50% Zn), где роль абразива могут выполнять первичные кристаллы Zn и Sn в припое. Процесс удаления оксидной пленки при этом ведут при температурах ниже температуры ликвидуса, но выше солидуса припоя, когда первичные кристаллы разделены друг от друга жидкой фазой. Недостатки бесфлюсовой низкотемпературной пайки с абразивным удалением оксидной пленки – низкая производительность процесса, неравномерность толщины слоя лужения, наличие необлуженных мест ввиду трудности контроля процесса разрушения пленки, загрязнение припоя частицами абразива.

Наиболее важны процессы бесфлюсовой пайки при сборке электронных устройств и приборов, где требуется исключить применение флюсов, поскольку продукты их разложения способствуют развитию коррозионных процессов, при этом ухудшаются рабочие характеристики полупроводниковых приборов и интегральных схем, снижаются надежность и долговечность электронной аппаратуры. При пайке микрополосковых плат, кремниевых кристаллов полупровод-

никовых приборов к неметаллизированным керамическим подложкам удаляют оксидные пленки за счет вибраций одной из соединяемых деталей, преимущественно верхней, а вторая остается неподвижной в течение всего процесса.

Притирка осуществляется на установках типа ЭМ–4025, ЭМ–415, ЭМ–445 передачей вибраций частотой 1–100 Гц на соединяемые детали (рис. 4.6). При перемещении паяемой поверхности платы 3, закрепленной в держателе 2, относительно основания 5 в параллельной плоскости с помощью вибратора 1 с амплитудой до 1 мм оксидные пленки на паяемых поверхностях 4 разрушаются. Процесс пайки осуществляется без флюсов в интервале температур 130–610°C в течение 30–60 с. Прочность паяных соединений при этом достаточно высокая и превышает значения, полученные в случае пайки в среде защитных газов. К недостаткам метода следует отнести длительность процесса, необходимость обеспечения высокой параллельности плоских поверхностей паяемых деталей, воздействие вибраций значительной амплитуды на элементы.

Для эффективного удаления оксидных пленок с поверхности расплава необходимо, чтобы работа сил вибрации значительно превосходила работу сил когезии расплава:

$$W_{\text{вибр}} \geq (5-10)W_{\text{ког}} \quad (1)$$

Учитывая, что интенсивность колебаний в расплаве равна:

$$I = 0,5\rho c(\omega A)^2 \quad (2)$$

где ρ – плотность расплава, c – скорость распространения колебаний, ω – круговая частота, A – амплитуда колебаний, тогда работа сил вибрации составит:

$$W_{\text{вибр}} = ISt \quad (3)$$

где S – площадь кристалла, t – время.

Работа сил когезии затрачивается на образование двух единичных поверхностей расплава с поверхностной энергией $\sigma_{1,2}$ на площади S :

$$W_{\text{ког}} = 2\sigma_{1,2}S \quad (4)$$

При амплитуде колебаний 250–500 мкм с частотой 5 Гц в течение 1с работа сил вибрации в расплаве составляет 0,5–1,0 Дж, что в среднем на три порядка превышает работу сил когезии расплава в свободном состоянии (0,5 мДж), что вполне достаточно для вытеснения оксидных пленок из зоны пайки.

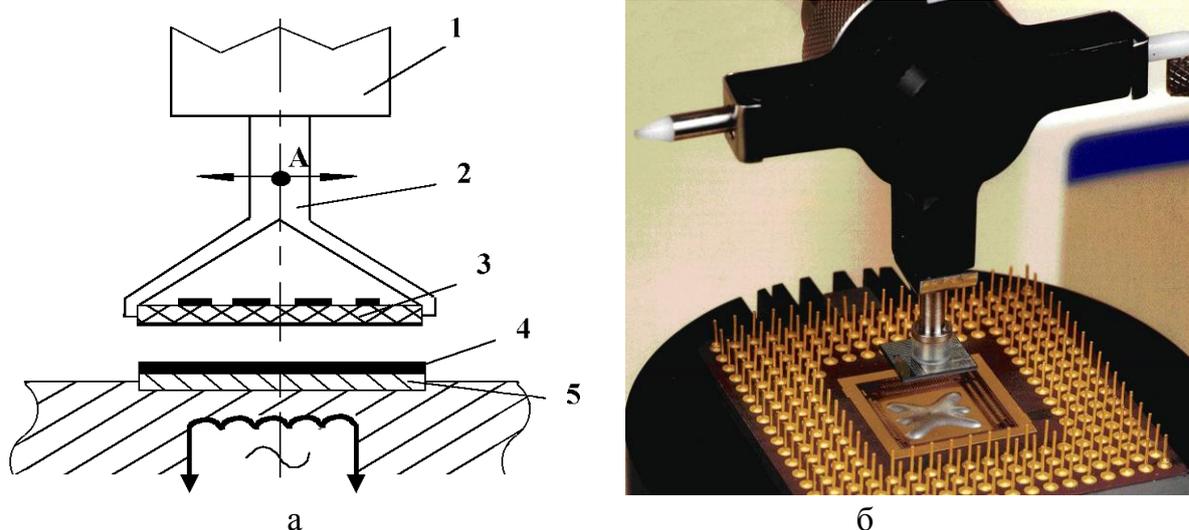


Рис. 4.6. Схема (а) и внешний вид (б) пайки с притиркой паяемых поверхностей

Самым распространенным способом удаления оксидов в процессе пайки является флюсование. Флюс как химический реагент имеет два основных назначения: очистить поверхность металла от оксидов; уменьшить поверхностное натяжение припоя и угол смачивания.

Типичные представители активных флюсов содержат в качестве растворителя воду или спирты, активаторами являются неорганические и органические кислоты либо их соли, например соляная или фосфорная кислота, неорганические соли ($ZnCl_2$, NH_3Cl , $SnCl_2$, $CuCl$ и др.). При взаимодействии хлористого цинка и воды образуется соляная кислота, которая растворяет оксиды на поверхности металла:



В результате образуется хлористая медь, которую ввиду ее хорошей растворимости в воде необходимо удалять с поверхности детали. Поскольку флюс на основе хлористого цинка обладает высокой активностью, его остатки оказывают коррозионное воздействие и должны тщательно удаляться.

Ультразвуковое (УЗ) удаление оксидных пленок основано на введении упругих механических колебаний частотой 18—45 кГц в расплавленный припой и создании в нем кавитации, а также ряда сопутствующих явлений: звукового давления, микро- и макропотоков. Кавитация сопровождается возникновением, развитием и захлопыванием газовых полостей в жидкой среде. Реальные жидкости и расплавы содержат нерастворимые примеси, на поверхности которых в трещинах и углублениях могут находиться нерастворенные пузырьки газа размером 10^{-6} — 10^{-7} м. При введении в расплав УЗ-колебаний интенсивностью 10^4 Вт/м² эти зародыши кавитации начинают пульсировать с частотой колебаний. Их количество увеличивается за счет образования разрывов в жидкой среде при интенсивностях ультразвука более $2 \cdot 10^4$ Вт/м² [5].

Динамика развития кавитационных полостей размером $1 \cdot 10^{-5}$ м в УЗ поле при различных интенсивностях ультразвука показана на рис. 4.7. При давлении УЗ волны $2 \cdot 10^5$ Па расширенная полость захлопывается и сконцентрированная в очень малом объеме кинетическая энергия трансформируется частично в силовой импульс и частично в тепловую энергию. Из центра захлопнувшейся полости распространяется ударная сферическая волна, давление в которой на расстоянии, равном $10R_0$ (по расчетным данным), составляет 150 МПа, а температура — 1000°C и выше. Разрушение оксидных пленок металлов происходит в основном за счет действия кавитации в жидком припое, тогда как вторичные эффекты ультразвука способствуют перемешиванию припоя и ускорению процесса лужения. Захлопывание кавитационных полостей и создание микропотоков в расплавленном припое приводят к удалению оксидных пленок с поверхности металла, что позволяет осуществлять пайку и лужение труднопаяемых металлов: алюминия, магния и никеля, тугоплавких металлов и сплавов на их основе.

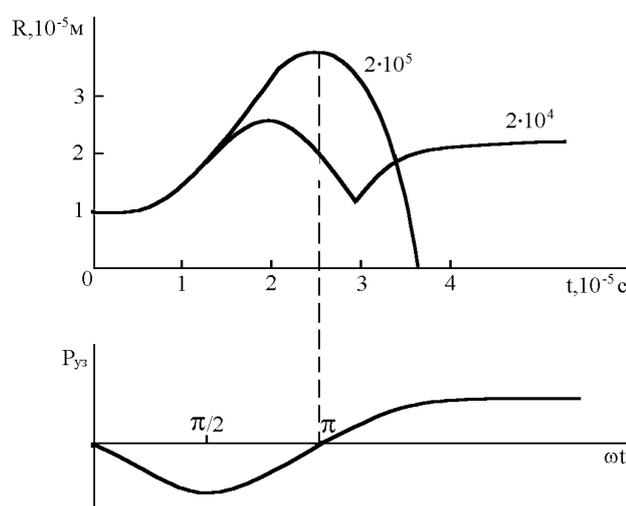


Рис. 4.7. Динамика кавитационных полостей в расплаве припоя

Отрыв оксидных пленок вызывается высокими местными давлениями (до 10^5 МПа), возникающими вблизи захлопывающихся кавитационных пузырьков.

Схематично разрушение оксидной пленки 1 на поверхности алюминия 3 показано на рис. 4.8. Стрелками отмечены направления гидродинамических ударов, возникающих при захлопывании кавитационных пузырьков. Вскрытая от оксидной пленки поверхность основного металла равномерно смачивается припоем 2. Возможный механизм разрушения хрупкой оксидной пленки определяется ее раскалыванием и отслоением в результате микроударов, появляющихся при захлопывании кавитационных пузырьков.

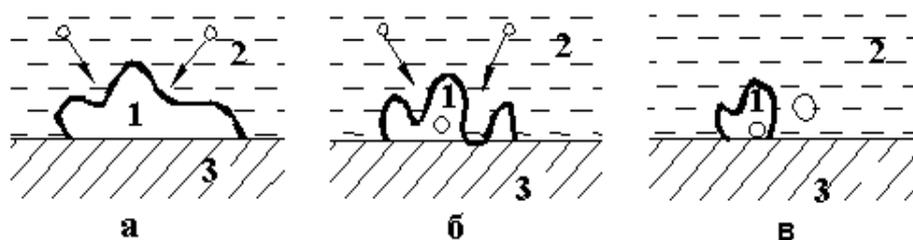


Рис. 4.8. Последовательность разрушения оксидных пленок при кавитации (а–в)

Этот процесс был изучен с помощью высокоскоростной киносъемки [6]. В случае если при интенсивных колебаниях пульсирующего кавитационного пузырька силы сцепления пленки с поверхностью превосходят прочность самой пленки, то свободные кусочки пленки отрываются от поверхности (рис. 4.9, б). Если прочность пленки превосходит силы сцепления, то вся пленка отслаивается от поверхности.

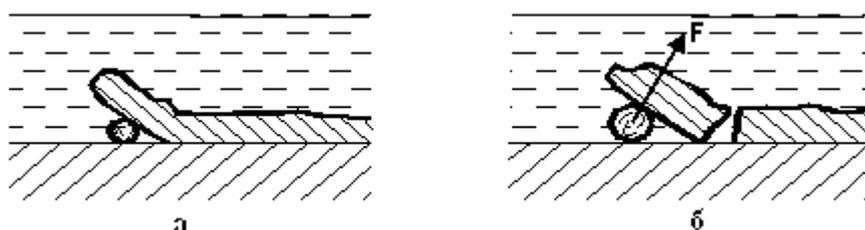


Рис. 4.9. Схема отслоения пленки пульсирующим кавитационным пузырьком

Таким образом, кавитация и вторичные эффекты ультразвука создают необходимые предпосылки для смачивания расплавом припоя поверхности твердого тела, сопровождающегося понижением угла смачивания и увеличением коэффициента растекания.

4.3. Процессы на межфазной границе раздела припой – паяемая поверхность

Взаимодействие на межфазной границе "основной металл — жидкий припой" связано с процессами смачивания и растекания припоя по паяемой поверхности. Процесс смачивания основного металла припоем состоит в замене межатомных связей, возникших между металлами в твердой фазе, на металлическую связь атомов на границе раздела между ними. При этом взаимодействие сил поверхностного натяжения определяет контактный угол смачивания θ (рис. 4.10). Условию равновесия капли на поверхности отвечает минимум свободной поверхностной энергии $E_{\text{п}}$, под которой понимают избыток энергии поверхностных атомов вследствие несбалансированности сил связи в решетке. При этом изменение поверхностной энергии описывается уравнением Юнга:

$$\frac{dE}{dS} = \delta_{1,3} - \delta_{2,3} - \delta_{1,2} \cos \theta = 0, \quad (4.8)$$

Из выражения (4.8) следует, что

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{1,2}}. \quad (4.9)$$

Величина $\cos \theta$ служит параметром количественной оценки степени смачивания:

- 1) полное смачивание при $\cos \theta = 1$, $\theta = 0$;
- 2) ограниченное смачивание при $0 < \cos \theta \leq 1$ ($0 \leq \theta \leq 90^\circ$, $\sigma_{2,3} \leq \sigma_{1,3}$);
- 3) несмачивание при $-1 \leq \cos \theta < 0$ ($90^\circ \leq \theta < 180^\circ$, $\sigma_{2,3} > \sigma_{1,3}$).

Работа сил адгезии W_a связана с образованием межфазной границы с энергией $\sigma_{2,3}$ вместо единичных поверхностей с энергиями $\sigma_{1,2}$ и $\sigma_{1,3}$:

$$W_a = \sigma_{1,2} + \sigma_{1,3} + \sigma_{2,3}. \quad (4.10)$$

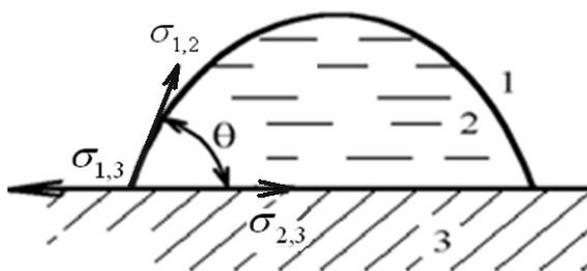


Рис. 4.10. Схема равновесия сил поверхностного натяжения:
1 — газ; 2 — припой; 3 — основной металл

Для преодоления сил сцепления частиц внутри самой жидкости (сил когезии) необходимо затратить работу сил когезии по образованию двух единичных поверхностей жидкости с энергиями $\sigma_{1,2}$, т. е.

$$W_k = 2\sigma_{1,2}. \quad (4.11)$$

С учетом выражений (4.10) и (4.11) можно формулу (4.9) привести к виду

$$\cos \theta = \frac{2W_a - W_k}{W_k}. \quad (4.12)$$

Жидкие металлы и сплавы обладают более высоким поверхностным натяжением, чем неметаллические жидкости. Так, для припоя типа ПОС 61 $\sigma_{1,2} = 0,5$ Н/м, что на порядок превышает поверхностное натяжение воды. В этом случае образование связи под действием сил Ван-дер-Ваальса не может обеспечить смачивание. Для выполнения при пайке условия смачивания на межфазной границе должны образовываться высокоэнергетические межатомные связи химической природы с большой работой сил адгезии W_a (металлические, металлоковалентные и др.). Реальные пути улучшения смачивания заключаются в применении защитных газовых сред (снижение $\sigma_{1,2}$) и более тщательной очистке контактирующих поверхностей твердой и жидкой фаз от оксидных пленок (снижение $\sigma_{2,3}$).

При рассмотрении условий равновесия системы "припой—основной металл" во флюсовой среде (рис. 4.11) вместо $\sigma_{1,2}$ вводят $\sigma_{2,4}$ (межфазное натяже-

ние на границе "флюс–основной металл"). При этом $\sigma_{2,4} < \sigma_{1,2}$, $\sigma_{3,4} < \sigma_{1,3}$, а уравнение для краевого угла имеет вид

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{3,4} - \sigma_{2,4}}{\sigma_{2,3}}. \quad (4.13)$$

Для реализации условия смачивания в данном случае необходимо вытеснение припоем прореагировавшего флюса по мере удаления оксидной пленки с поверхности основного металла, что выполняется при $\sigma_{2,3} < \sigma_{3,4}$.

При достаточном химическом сродстве компонентов основного металла и припоя энергия $\sigma_{2,3}$ мала, а работа W_a велика. В этом случае реализуется второе условие смачивания: $W_a > \sigma_{2,4}$.

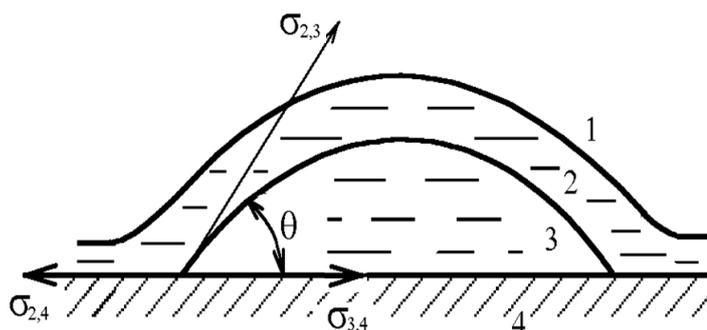


Рис. 411. Схема равновесия сил поверхностного натяжения во флюсовой среде: 1 – газ; 2 – флюс; 3 – припой; 4 – основной металл

Растекание припоя по поверхности основного металла происходит в результате взаимодействия сил поверхностного натяжения и сопровождается сближением жидкой и твердой фаз. Коэффициент растекания припоя можно определить из условия отношения работ сил адгезии и когезии:

$$K_p = W_a / W_k = \sigma_{1,2} (\cos \theta + 1) / 2\sigma_{1,2} = (1 + \cos \theta) / 2 > 0. \quad (4.14)$$

Тогда при полном смачивании $\cos \theta = 1$, $\theta = 0$; $K_p = 1$; ограниченном $0 < \cos \theta \leq 1$, $0 \leq \theta \leq 90^\circ$, $K_p = 0,5$; несмачивании $-1 \leq \cos \theta < 0$, $90^\circ \leq \theta < 180^\circ$, $K_p = 0$.

4.4. Капиллярное проникновение припоя и диффузия

При смачивании припой заполняет зазоры между соединяемыми деталями, образуя мениски вблизи вертикальных стенок и проявляя тем самым капиллярные свойства. Разность давлений, действующих на искривленную поверхность жидкости, представляет капиллярное давление p_k , определяемое уравнением Лапласа [7]:

$$p_k = p_1 - p_2 = \sigma_{1,2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (4.15)$$

где p_1 , p_2 – давление жидкости для выпуклой и вогнутой поверхностей соответственно; R_1 , R_2 – радиусы кривизны поверхностей.

Для выпуклой поверхности P_k считают положительным и направленным внутрь жидкости, для вогнутой поверхности P_k отрицательно и направлено наружу от поверхности жидкости. При малом диаметре D капилляра свободная поверхность жидкости имеет форму сферы (рис. 4.12) радиусом

$$R = \frac{D}{2 \cos \theta}. \quad (4.16)$$

Подставив значение радиуса мениска в уравнение (4.16), получим

$$p_1 - p_2 = \sigma_{1,2} \left(\frac{2 \cos \theta}{D} + \frac{2 \cos \theta}{D} \right) = 4 \frac{\sigma_{1,2} \cos \theta}{D}. \quad (4.17)$$

Разность давлений $p_1 - p_2$ уравнивается столбом припоя высотой h :

$$h \rho g = \frac{4 \sigma_{1,2} \cos \theta}{D}. \quad (4.18)$$

Из уравнений (4.16) и (4.18) следует, что высота подъема припоя в капилляре круглого сечения пропорциональна его поверхностному натяжению и смачивающей способности и обратно пропорциональна диаметру капилляра и плотности припоя:

$$h = \frac{4 \sigma_{1,2} \cos \theta}{D \rho g}. \quad (4.19)$$

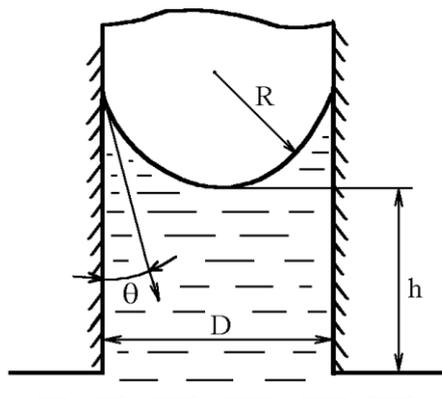


Рис. 4.12. Схема подъема жидкости в капилляре

В отличие от обычных жидкостей расплав представляет собой систему, состоящую из нескольких компонентов, и в процессе его растекания происходит физико-химическое взаимодействие компонентов и основного металла, растворение основного металла в припое, взаимодействие с газовыми и флюсующими средами. При вытеснении припоем флюса из капилляра высота подъема припоя определяется выражением

$$h_1 = \frac{4 \sigma_{1,2} \cos \theta}{D g (\rho_{\text{пр}} - \rho_{\text{ф}})}. \quad (4.20)$$

В горизонтальном капилляре шириной h для припоя с вязкостью η время затекания t на длину капилляра l определяется следующим образом:

$$t = \frac{6 \eta L^2}{\sigma_{2,3} \cos \theta h}. \quad (4.21)$$

На втором этапе физико-химического взаимодействия припоя и основного металла основную роль играют процессы диффузии. Процесс диффузии при постоянной температуре и стационарном во времени потоке вещества описывается первым уравнением Фика:

$$m = -D \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (4.22)$$

где m – количество диффундирующего вещества; D – коэффициент диффузии; C – концентрация вещества; x – координата. Минус указывает на то, что процесс диффузии идет в направлении уменьшения концентрации вещества.

В реальных условиях скорость диффузии—величина переменная во времени, поэтому процесс диффузии подчиняется второму уравнению Фика:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (4.23)$$

где $\partial C/\partial t$ – скорость изменения концентрации диффундирующего вещества.

Коэффициент диффузии зависит от температуры:

$$D = D_0 e^{-(Q/RT)}, \quad (4.24)$$

где D_0 – коэффициент, зависящий от типа кристаллической решетки; Q – энергия активации диффузии; R – универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ кДж/(кмоль·град); T – абсолютная температура.

Для практических целей решение второго уравнения Фика имеет вид

$$C_x = C_0 \left(1 - \Phi \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right), \quad (4.25)$$

где C_x – концентрация диффундирующего вещества на глубине x от поверхности; C_0 – концентрация вещества на поверхности; Φ – интеграл функции ошибок Гаусса.

На скорость процесса диффузии помимо температуры оказывает влияние состояние металла. Наклеп, сопровождающийся искажением кристаллической решетки и появлением вакансий, увеличивает диффузию по границам зерен и вдоль дислокации, что приводит к увеличению диффузионной зоны. Диффузионные процессы при пайке позволяют увеличить механическую прочность соединений, однако образование интерметаллидных соединений в спае типа Cu_3Sn , AuSn_2 при глубокой взаимной диффузии компонентов вызывает снижение прочности паяных соединений (рис. 4.13).

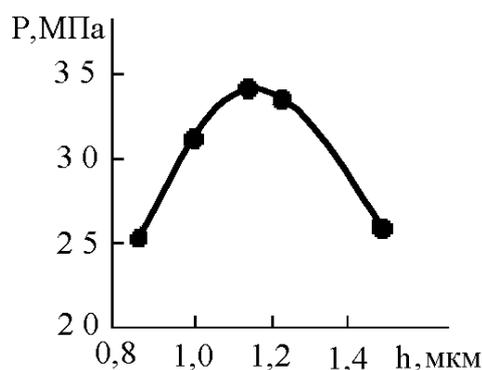


Рис. 4.13. Зависимость прочности паяных соединений от ширины диффузионной зоны

4.5. Кристаллизация припоя и формирование структуры соединений

Процесс кристаллизации припоя сопровождается затвердеванием жидкой металлической прослойки расплавленного металла в зазоре. При этом изменение энтропии системы ΔS равно разности энтропий жидкого и твердого состояний:

$$\Delta S = S_{\text{ж}} - S_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{пл}}}{T_{\text{к}}}, \quad (4.26)$$

где $Q_{\text{пл}}$ – скрытая теплота плавления; $T_{\text{к}}$ – температура кристаллизации.

Основными особенностями кристаллизации при пайке являются:

- неравновесность процесса, т. е. отсутствие выравнивания состава в жидкой фазе, что приводит к выделению в паяном шве наряду с легкоплавкими тугоплавких фаз повышенной хрупкости;
- влияние основного металла в виде эпитаксиально-ориентированной кристаллизации зерен припоя вблизи поверхности основного металла;
- ярко выраженная ликвация в паяном шве — появление зональных неоднородностей, дендритных образований, отличающихся меньшей прочностью;
- зависимость характера кристаллизации от объема припоя в зазоре.

Для получения надежных паяных соединений применяют эвтектические припои с узкой зоной кристаллизации, а также уменьшают время кристаллизации, что способствует получению мелкозернистой структуры спая. Для сокращения времени кристаллизации припоя в соединении применяют обдув инертным газом или наносят химически инертную теплостойкую жидкость.

Ликвационные явления, происходящие при кристаллизации паяного шва, во многом зависят от величины зазора в соединении. При относительно больших зазорах (0,5 мм и более) кристаллизация большинства припоев происходит с образованием развитой дендритной структуры. В условиях малых зазоров (0,3 мм и менее) имеет место послойная, направленная кристаллизация жидкого сплава.

Кристаллизация жидкого металла в паяном шве происходит в условиях ориентирующего влияния подложки (основного металла), когда границы зерен припоя в кристаллизационной зоне продолжают границы зерен основного металла. Ориентированная кристаллизация в паяных швах наиболее характерна тогда, ко-

гда припой и паяемый металл имеют общую металлическую основу или одинаковый тип кристаллической решетки.

В результате физико-химического взаимодействия припоя и основного металла образуется паяное соединение с определенной структурой. Паяный шов включает зону сплавления (припой) и диффузионные зоны на границе между припоем и основным металлом (рис. 4.14). Конечная структура и состав паяного соединения зависят от природы взаимодействующих металлов, их химического сродства, времени и температуры пайки. Различают следующие спаи:

- *бездиффузионный*, в котором существующими методами анализа не удастся обнаружить зоны диффузии; такой спай образуется между металлами со слабым химическим сродством, низким коэффициентом взаимной диффузии, малым временем пайки и ограниченной температурой (например, соединение Fe—Sn);
- *растворно-диффузионный*, в котором реагирующие компоненты образуют твердые растворы или промежуточные фазы (интерметаллиды, например Au—Sn, Ag—Sn и др.);
- *контактно-реакционный*, который возникает при контакте металла с полупроводником; в результате образуется эвтектический сплав с низкой температурой плавления (Au—Si).

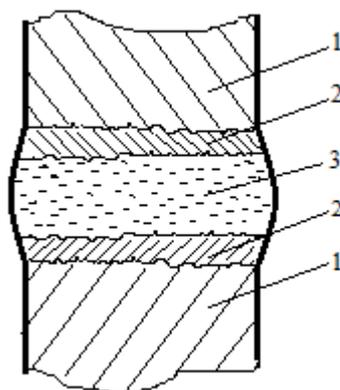


Рис. 4.14. Структура паяного соединения: 1 – соединяемые металлы, 2 – зона диффузии, 3 – припой

В случае бездиффузионного спаивания прочность соединения определяется свободной энергией атомов на межфазной поверхности, зависящей от степени разориентированности кристаллов основного металла и характера энергии связи. Прочность такого соединения будет больше, чем выше ювенильность поверхности основного металла и чем чистота окружающей среды.

В растворно-диффузионных спаиваниях возможно появление непрерывных и ограниченных твердых растворов, эвтектик и интерметаллических соединений. Растворение основного металла в расплаве припоя приводит к выделению избыточной фазы при кристаллизации паяного шва. Равномерного распределения компонентов в паяном шве в условиях растворно-диффузионного спаивания можно достигнуть при очень малых зазорах в соединении (менее 0,1 мм). Такая структура шва характеризуется высокой прочностью соединения.

Список литературы к главе 4

1. Петрунин И.Е. Физико-химические процессы при пайке. – М.: Высш. школа, 1972. – 280 с.
2. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА.– М.: Высш. школа, 1987.– 376 с.
3. Симонов, О. Технология плазменной очистки при микросборке / О. Симонов // Электроника. Наука. Технология. Бизнес.– 2016. – № 3(00064). – С. 148–152.
4. Кантер, А. Вакуумная пайка–залог качественного соединения / А. Кантер // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 6. – С. 30–33.
5. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. В 2 т. Т.1 / С. П. Кундас [и др.]; под ред. А.П. Достанко. – Минск: Бестпринт, 2003. – 224 с.
6. Кнэпп Р., Дэйли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. – М.: Мир, 1974. – 686 с.
7. Долгов Ю.С., Сидохин Ю.Ф. Вопросы формирования паяного шва. – М.: Машиностроение, 1973. – 136 с.

ГЛАВА 5

ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ И ФИНИШНЫЕ ОПЕРАЦИИ ПРИ ПАЙКЕ

5.1. Лужение поверхностей деталей и компонентов

С освоением групповых механизированных процессов пайки печатного монтажа возникла проблема паяемости монтажных элементов. Ее возникновение обусловлено разнородностью применяемых металлов и металлопокрытий, их пористостью, разными сроками и условиями хранения, различной стойкостью к воздействию внешней среды, а, следовательно, и различной паяемостью. Различная паяемость монтажных элементов приводит к низкому качеству электро-монтажных соединений после групповой пайки, что сопровождается значительным браком, достигающим 5–6%. Для улучшения паяемости применяются:

- оплавление электролитических покрытий погружением в нагретые до 240—260⁰С глицерин или флюс марки ФДГл, что эффективно для легкоплавких покрытий сплавами: олово—висмут, олово—свинец или олово— никель;
- лужение в оловянно-свинцовых или оловянно-свинцово-висмутовых припоях с выравниванием воздушным ножом;
- нанесение иммерсионных покрытий на монтажные элементы.

По сравнению с оплавлением лужение является универсальным, наиболее эф-

фективным и широко распространенным способом, поскольку обеспечивает высокую паяемость элементам без каких-либо покрытий. Более того, лужение является единственным способом удаления золотых покрытий с выводов навесных элементов и тем самым исключает опасность образования интерметаллидов и охрупчивания соединений.

Типовой технологический процесс лужения монтажных элементов, печатных плат и конструктивных деталей содержит следующие операции: флюсование облуживаемых поверхностей, лужение, удаление излишков припоя, отмывку остатков флюса, сушку. Процессы лужения выполняются вручную электропаяльниками и механизированными способами – погружением в припой или в волну припоя. Лужение поштучно электропаяльником применяют при малых партиях деталей и при исправлении дефектов механизированного группового лужения.

Основные параметры процесса: температура и время, а также состав флюсов и припоев устанавливаются в зависимости от конструктивных особенностей и стойкости облуживаемых элементов к тепловым нагрузкам, флюсам и растворителям для удаления их остатков (табл. 5.1). Применение припоев ПОСВ 33 и ПОСК 50-18 позволяет значительно снизить температуру лужения для ГПК на основе лавсана, что исключает расплавление и ухудшение изоляционных свойств, а при лужении МПП погружением или волной припоя снижает тепловой удар и опасность разрыва межслойных соединений в платах [1].

Таблица 5.1. Элементы, материалы и режимы лужения

Монтажные и конструктивные элементы	Марки материалов		Режимы	
	Флюса	Припоя	Температура, °С	Время, с
Концы проводов и кабелей	ФПЭт,	ПОС61, ПОС 61М	250–260	1 – 4
ГПК, лепестки и штыри, армированные пресс-материалами	ФКТ, ФКСп,	ПОСВ 33, ПОСК 50-18	170–190 180–200	2 – 3
Выводы микросхем и полупроводниковых приборов	ФКЭт	ПОС 61	240–250	1 – 2
Выводы теплоустойчивых элементов	ФКЭт, ФСкПс	ПОССу 61-0,5 ПОССу 50-0,5	250–270	2 – 3
Монтажные элементы печатных плат и МПП	ФГСп, ФСкПс, ФДФс, ФТС	ПОС 61, ПОСВ 33	250–260 180–190	2 – 3
Конструктивные детали	ФГСп, ФСкПс, ФДГл	ПОССу 61-0,5 ПОССу 50-0,5	250–270	3–5

Детали из алюминиевых сплавов	ФТБф	ПОЦ 10, ПОЦ 20, ПОЦ 30	200–250 280–300 320–350	2–4
-------------------------------	------	------------------------------	-------------------------------	-----

В мелкосерийном производстве применяют небольшие паяльные ванны из высококачественной стали вместимостью 850–1000 г припоя с поддержанием температуры расплава в диапазоне 100–500°C на заданном уровне. Термоизолированная оправа ванны обеспечивает высокую безопасность и увеличивает эффективность лужения деталей. Сборщик отходов, располагающийся вокруг оправы ванны, обеспечивает чистую область работы (рис. 5.1). Излишки припоя удаляются вручную с помощью ракеля или встряхиванием, а также с помощью центрифуги. При центрифугировании излишки жидкого припоя удаляются с облуженных поверхностей под действием центробежных сил, что исключает ручные приемы труда, оздоравливает его условия, поддается автоматизации и гарантирует стабильное высокое качество покрытия, которое не зависит от мастерства исполнителя. Центрифугирование позволяет в определенных пределах регулировать толщину покрытия за счет изменения частоты вращения вала центрифуги.



Рис. 5.1. Ванна для лужения деталей и компонентов

Покрытие припоем с выравниванием воздушным ножом HASL (Hot Air Solder Leveling) до недавнего времени преобладало в электронной промышленности благодаря отличным характеристикам паяемости сплава олово-свинец и его относительной дешевизне по сравнению с покрытиями на основе благородных металлов. В результате классического HASL-процесса контактные площадки платы покрываются слоем эвтектического сплава олово-свинец толщиной, как правило, от 1 до 40 мкм, а излишки припоя при этом сдуваются «воздушными ножами» — струями горячего воздуха. Недостатком HASL является неравномерность покрытия, вызванная образованием наплывов припоя и ведущая к образованию неплоских контактных площадок. Такой дефект вызывает смещение отпечатков паяльной пасты и электронных компонентов. Для контактных площадок с малым шагом (0,5 мм и менее) возможно образование перемычек.

Для обеспечения паяемости печатных плат наибольшее распространение получили иммерсионные покрытия (immersion – погружение), получаемые путем химической реакции замещения в растворе. Этот метод химического осаждения обеспечивает достаточно тонкие и однородные покрытия тех участков, где имеется открытая медь. Покрытие из химического никеля/иммерсионного золота (ENIG) в виде тонкой (0,05–0,2 мкм) золотой пленки, наносимой поверх подслоя никеля (4–5 мкм), обеспечивает лучшую плоскостность, чем у HASL, при сохранении хорошей паяемости. Золото хорошо растворяется в припое, не подвержено быстрому потускнению и окислению, поэтому представляется прекрасным выбором в качестве финишного покрытия. Известны три вида дефектов, связанных с использованием финишного покрытия ENIG: пористое золотое покрытие, охрупчивание золота, эффект «черной контактной площадки».

В процессе восстановления никеля на поверхности медной площадки может выделяться фосфор, при пайке и растворении золота в припое этот поверхностный слой фосфора обнажается и припой не смачивает его поверхность и скатывается с нее.

Операция лужения выводов электронных компонентов в технологическом процессе сборки радиоэлектронной аппаратуры во многом определяет надежность паяных соединений. Однако существующие технологические процессы лужения не всегда обеспечивают полностью высокого качества покрытия компонентов с большими сроками хранения из-за невозможности применения таких активных флюсов как ЛТИ–120, вызывающих впоследствии коррозию выводов элементов и микросхем. Поэтому для восстановления паяемости покрытий без использования флюсов применяют УЗ лужение.

Непременным условием процесса УЗ лужения является наличие защитной среды в зоне лужения. Это связано с тем, что под воздействием УЗ колебаний происходит интенсивное окисление поверхности припоя, и часть образующихся оксидов остается на выводах микросхем после лужения. Оптимальная амплитуда смещения торца излучателя составляет 10–12 мкм, частота 44 кГц \pm 0,15%; расстояние между излучающей поверхностью концентратора и выводов микросхемы (1,5 \pm 0,5) мм; расход защитной среды – аргона $3 \cdot 10^{-5}$ м³/с [2].

УЗ колебания, введенные в расплав припоя, изменяют его гидродинамическое и тепловое состояние, что приводит к изменению температуры нагрева выводов микросхем в процессе их лужения. Температура нагрева выводов при УЗ лужении по сравнению с лужением без ультразвука увеличивается на 10–16°C, что равносильно повышению температуры припоя на 20–30°C. Таким образом применение ультразвука позволяет снизить температуру припоя, благодаря чему облегчается его защита от окисления.

Паяемость выводов резисторов типа МЛТ, имеющих серебряное покрытие и хранящихся в течение 24 месяцев в картонной коробке, из-за потемнения серебряного покрытия становится неудовлетворительной в присутствии 20%-ного спиртоканифольного флюса. Применение активных флюсов типа ЛТИ-120 и ме-

ханической зачистки выводов улучшило паяемость и сократило время смачивания, определенное методом шарика припоя, до 1 с, однако эти методы либо трудоемки, либо требуют тщательной отмывки выводов (табл. 5.2).

Таблица 5.2. Паяемость выводов компонентов после обработки

Вид обработки	Время смачивания, с	Оценка паяемости
Флюсование ФКСп	11–13	Неудовлетворительная
Флюсование ФГСп	2,0–3,9	Плохая
Флюсование ЛТИ-120	1,0–1,2	Удовлетворительная
Механическая зачистка, флюсование ФКСп	0,6–0,8	Хорошая
УЗ лужение	0,25–0,5	Отличная

Выводы резисторов МЛТ с неудовлетворительной смачиваемостью припоем при УЗ лужении в модернизированной ванне УЗВЛ-0,4 в течение 2 с полностью восстановили паяемость. Слой припоя ПОС 61 на выводах был ровным, блестящим, без пор и несмоченных участков. Эффективным оказалось также применение УЗ лужения для выводов конденсаторов К50, К53, диодов 2Б503А, имеющих серебряное покрытие, микросхем в корпусе типа DIP и блоков резисторов Б20 с покрытием горячим лужением [3], что снижает трудоемкость на 50–70%.

5.2. Методы флюсования

К вспомогательным операциям процесса групповой пайки относятся: обезжиривание, нанесение маски, флюсование, удаление маски, отмывка флюса, сушка и контроль. При обезжиривании плату погружают в органический растворитель на 7–10 с так, чтобы верхняя сторона покрывалась слоем растворителя на 0,5–1 мм.

На паяемые поверхности флюсы наносятся вручную с помощью кисти, дозатора или механизировано накаткой роликами, погружением во флюс, жидкой или пенообразной волной флюса. Флюсование кистью или дозатором применяется при лужении небольших партий деталей, а также при исправлении дефектов группового лужения с помощью электропаяльников.

Групповой способ накатки флюса применяется для флюсования монтажных элементов ГПК, шлейфов и печатных плат. Независимо от способа нанесения флюса процесс должен обеспечивать сплошное смачивание флюсом всей обрабатываемой поверхности монтажного элемента. Флюс должен наноситься в количестве, достаточном для последующего лужения заданной поверхности.

Процесс флюсования поверхностей монтажных элементов негерметичных сборок должен исключать затекание флюса внутрь и попадание его на поверхно-

сти контактов разъемов и реле. На обслуживаемые поверхности концов проводов и кабелей флюс наносится не ближе, чем в 3 мм от торца изоляции.

Флюсование печатных плат осуществляют: погружением в ванну с флюсом, вращающимися щетками, напылением, волной или с помощью пены. Нанесение флюса погружением - малопроизводительно, не обеспечивает однородного и равномерного покрытия флюсом платы, требует строго выдерживать глубину погружения платы во флюс. Поэтому этот метод используется в мелкосерийном производстве.

Нанесение флюса вращающимися щетками обеспечивает механизацию процесса флюсования (рис. 5.2). Однако нерабочие части щеток, не погруженные во флюс, при остановке устройства засыхают, ворс на них слипается.

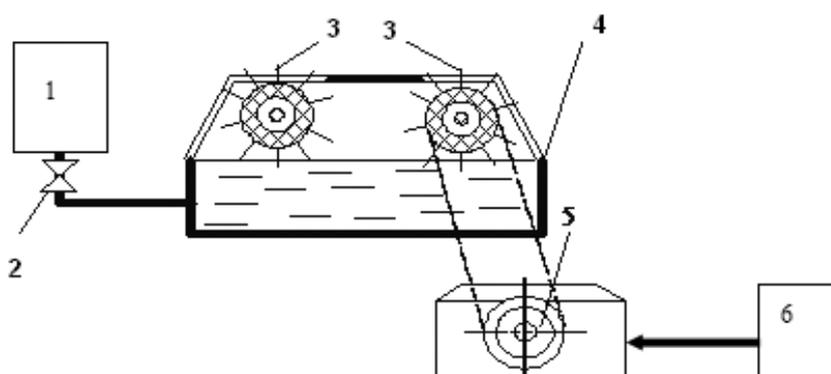


Рис. 5.2. Схема флюсования вращающимися щетками: 1 – емкость с флюсом, 2 – вентиль, 3 – щетки, 4 – ванна с флюсом, 5 – редуктор, 6 – электродвигатель

Нанесение флюса методом напыления с помощью одной пары сопел при расстоянии до платы 300 мм обеспечивает флюсование плата шириной до 100 мм. Для более широких плат применяют 2, 3 и более пар сопел. В установке для нанесения флюса напылением (рис. 5.3) флюс из резервуара 1 поступает через кран 2 в электромагнитный клапан 3 и оттуда в регулируемое жиклерное устройство 4 и дозирующее сопло 5 пульверизатора. Отсюда флюс захватывается потоком воздуха, выходящим из воздушного сопла 6 пульверизатора. Сжатый воздух подается через регулятор давления 9 и ресивер 10. Магистраль 8 служит для продува каналов клапана, жиклеров и сопла при их засорении остатками флюса.

Оборудование для нанесения флюса в виде пены (рис. 5.4) состоит из внутреннего 1 и наружного 2 резервуаров, соединенных между собой таким образом, чтобы жидкий флюс 3 свободно перетекал из одного отсека в другой. Во внутреннем резервуаре установлены жестко связанные между собой вспенивающие элементы 4, выполненные из пористых материалов (керамики, фетра, войлока) в виде дисков, трубок. При подаче через отверстие в элемент 4 сжатого воздуха флюс во внутреннем резервуаре вспенивается в виде "шапки пены" 7 и поднимается над резервуаром.

Наружный резервуар закрывается сеткой 8, которая способствует ускоренному превращению пены снова в жидкость. Для поддержания равномерного уровня поверхности пены над выходным отверстием используют вертикальные щетки 6. Расход флюса восполняется из емкости 9. Весьма важным фактором для образования равномерного по высоте гребня пены является однородность размеров ячеек пористого материала, из которого изготовлены вспенивающие элементы 4.

В устройстве для образования волны флюсующей жидкости (рис. 5.5), подача флюса осуществляется с помощью вращающейся крыльчатки 1 связанной с электродвигателем 2 жидкость в виде стоячей волны 4 на выходе канала 5 флюсующего состава. Регулирование высоты волны осуществляется изменением числа оборотов электродвигателя.

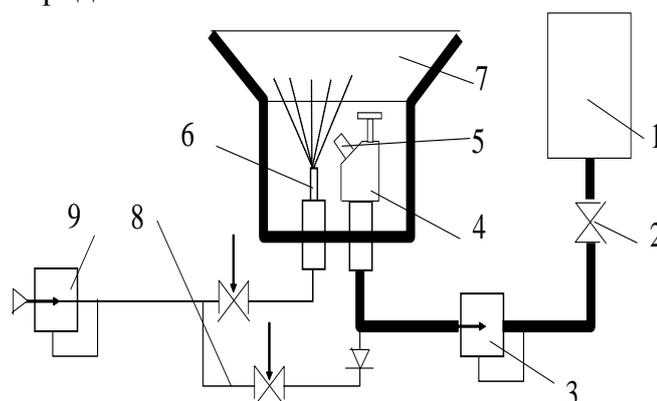


Рис. 5.3. Схема флюсования распылением

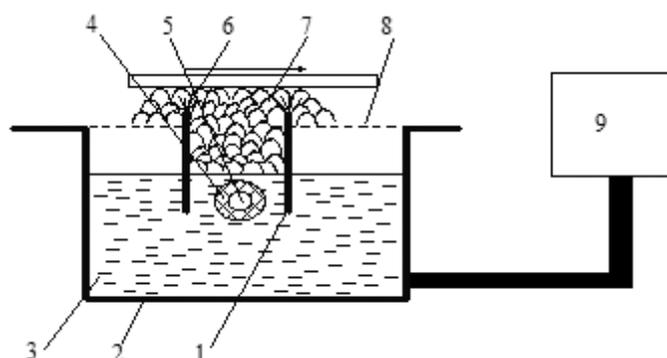


Рис. 5.4. Схема пенного флюсования

Скоростной напор потока флюса позволяет покрывать флюсом не только нижнюю сторону платы, но и обеспечивает проникновение ее в металлизированные отверстия многослойных плат. Излишки флюса удаляются с платы щеткой. В ванну 7 флюс подается через вентиль из емкости 8. Недостатками являются: сложность устройства, увеличенные габариты линии пайки.

Подсушка флюса перед пайкой в сочетании с предварительным подогревом печатных плат во многом определяет качество паяных соединений, особенно в крупносерийном и массовом автоматизированном производстве. Поскольку в

состав флюсов в качестве растворителей входят спирт и вода с температурой кипения 80° и 100°C соответственно, то при соприкосновении жидкого флюса с расплавленным припоем при температуре $230\text{--}250^{\circ}\text{C}$ происходит бурное кипение флюса с образованием значительного количества газов и паров.

За счет этого в припое образуются газовые раковины и паровые "карманы", приводящие к пористости соединения. Кроме того, поверхностные слои припоя, контактирующие с жидким флюсом, за счет его испарения существенно охлаждаются, что ухудшает смачиваемость поверхности печатных плат.

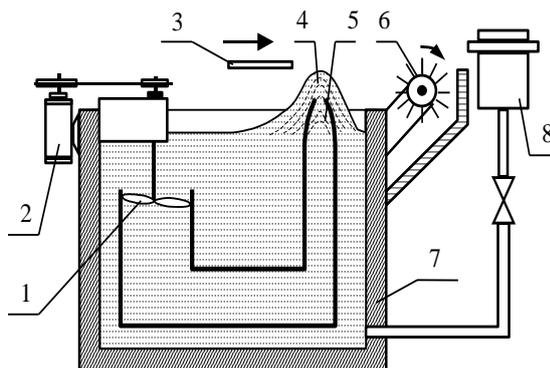


Рис. 5.5. Схема волнового флюсования

Поэтому важно при подсушке флюса добиться полного испарения растворителя из флюсующего состава. Такая задача решается нагревом нижней (паяемой) поверхности плат до температуры 85°C , если растворителем служит спирт, и до 100°C , если растворителем является вода. В результате предварительного подогрева плат перед пайкой уменьшается тепловой удар в момент соприкосновения платы с расплавленным припоем, что уменьшает коробление плат, позволяет снизить температуру пайки.

Нагрев плат осуществляют в камерах ИК сушки (рис. 5.6), где тепловое излучение от ИК лампы 1 отражается с помощью рефлектора и направляется на плату 2. Излишки флюса стекают в сборник 3. Для повышения равномерности нагрева вентилятором создают конвективный поток воздуха. Недостатком является возникновение дымления, что снижает интенсивность ИК излучения. Чтобы избежать этого ИК излучатели располагают под углом к горизонтальной поверхности платы, а для излишков флюса устанавливают специальные сборники, которые легко чистить.

Флюсование волной пенообразного флюса совершается при участии всей массы флюса в открытой ванне с большой поверхностью испарения летучих составляющих. Пенообразная волна формируется щелевым соплом в результате вспенивания жидкого флюса многочисленными струями воздуха, подаваемого в трубу из мелкопористой керамики под давлением от $0,01$ до $0,03$ МПа.

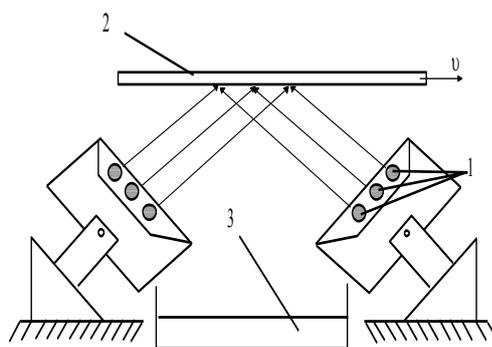


Рис. 5.6. Сушка платы ИК нагревом: 1– ИК - излучатели, 2– плата, 3– сборник флюса

Из-за перемешивания, продувки воздухом и большой поверхности испарения состав флюса в ванне быстро меняется. Возрастает его вязкость, ослабевает капиллярный эффект, уменьшается количество подаваемого в зазоры флюса, что ведет к снижению качества соединений. В виду этих сложностей пока не решена проблема автоматического контроля и поддержания постоянства состава флюса в ваннах с пенообразователями, работающих в составе линий пайки.

5.3. Дозирование заготовок припоя при массовой пайке

Широкому использованию пайки в массовом производстве способствовал выпуск заготовок припоев в виде закладных деталей, возможности применения которых весьма широки. Однако подобно тому, как для получения хорошего паяного соединения его необходимо специально конструировать под пайку, так и для закладных деталей необходимо рационально их конструировать и изготавливать по оптимальной технологии.

Заготовка припоя представляет собой выпускаемую в больших количествах деталь постоянного веса из припоя, которая может иметь и флюсовую набивку. Свойства закладных деталей делают их удобными для автоматической подачи и массового нагрева. Применение закладных деталей обладает многими достоинствами. В паяемый узел можно вводить заранее определенные количества припоя и флюса, что позволяет получать исключительно однородные соединения. При ручной пайке количество припоя, введенного в зазор, зависит от квалификации, опыта и внимательности оператора. При пользовании заготовками припоя достигается более высокая степень однородности паяных соединений, облегчается контроль качества. Размещение заготовок припоя легко автоматизировать, и достигаемая экономия оправдывает дополнительные расходы на их изготовление.

При использовании заготовок паяемые детали необходимо предварительно фиксировать в определенном положении. Большое значение имеет и метод нагрева, от которого требуется, чтобы детали доводились до температуры пайки в

определенной последовательности, гарантируя хорошую смачиваемость и заполнение зазора.

Заготовки припоя конструируются и изготавливаются в соответствии с геометрией конкретных соединений, намечаемых к пайке. Наиболее широко применяется профилированная проволока, которую выпускают постоянного сечения или из трубчатого припоя. Желательно применять трубку с гарантированным непрерывным флюсовым заполнением. Для того чтобы реализовать преимущества однородности соединений, необходимо, чтобы заготовки были свободны от пустот и содержали одинаковое количество флюса. Проволока выпускается в виде сегментов, отрезков, колец и спиралей, петель и других конфигураций.

Детали с просеченными отверстиями изготавливают из плоской ленты с флюсовой набивкой или из заготовки сплошного сечения, придавая им форму дисков, шайб, втулок и т. п. Диски и шайбы с флюсовой набивкой обычно имеют участок сплошного сечения, гарантирующий прочность этой слоистой конструкции. Шарики припоя выпускаются только сплошного сечения.

Металлические детали с покрытием из припоя представляют собой отрезки основного металла, на которые нанесен слой припоя определенной толщины, так что зазор заполняется как припоем, так и этим металлом, служащим для тех или иных целей. Такие детали могут иметь покрытие с одной или с двух сторон.

Конструирование паяного соединения с заготовками припоя включает следующие этапы:

- выбор достаточного зазора (до 0,08 мм) для выхода флюса и смачивания;
- проверку заготовки на правильную посадку в зазор при условии строгого соблюдения допусков;
- использование фиксирующих или направляющих выступов для улучшения условий сборки;
- введение конструктивных элементов, ограничивающих растекание жидкого припоя, например канавок, буртиков и т. д., так как во время пайки жидкий припой может скапливаться под действием силы тяжести в наиболее низких участках узла, либо затекать под действием капиллярных сил в узкие места;
- проверку на равномерность нагрева деталей до требуемой температуры.

Детали массивного сечения нагреваются медленнее тонких, поэтому расположение и мощность источника нагрева играют большую роль. Растекание припоя и смачивание им поверхности возможны лишь на достаточно нагретых поверхностях. Если соединение в целом не нагрето до нужной температуры, то возможно смачивание только одной из его деталей, что ведет к некачественному соединению.

Необходимо избегать появления областей повышенного или пониженного давления вблизи паяного шва до тех пор, пока припой не затвердел. В замкнутых полостях, заполненных газом, при нагреве имеет тенденция роста давления вследствие расширения газов. Если в конструкции узла дренирование не предусмотрено, то при пайке газ будет прорываться через жидкий припой. В результа-

те спай получается пористым, а сам припой может попасть в нежелательное место. При охлаждении сжимающийся в полости газ создаст подсос, так что припой может затечь в нее. Указанные недостатки можно предотвратить рациональным способом нагрева и охлаждения соединения. Для дренажа можно воспользоваться небольшим отверстием, которое, если необходима герметичность соединения, впоследствии запаивают.

Заготовку припоя конструируют в следующей последовательности [4]:

- определяют геометрию идеального спая, руководствуясь соображениями прочности, герметичности, доступности осмотра и т. д;
- рассчитывают объем идеального паяного соединения, включая контуры галтелей, используя номограммы, позволяющие определить идеальный объем по величинам, доступным для непосредственного замера;
- рассчитывают размеры заготовки припоя, исходя из ее идеальной величины. Если применяется трубчатая заготовка с флюсовой набивкой, то в расчет вводят поправку на объем, занимаемый флюсом.

При определении формы заготовки, наиболее близко подходящей по форме к контурам зазора, необходимо учитывать:

- возможность автоматической подачи заготовок в паяемую зону;
- удобство ввода заготовок различной формы (посадку, зазоры и т. д.);
- способность заготовок сохранять приданную им форму (тонкие легко изгибаются, разрезные кольца сцепляются друг с другом и т. п.);
- посадку заготовки на поверхности, через которую передается тепло, что важно для правильного нагрева и смачивания;
- расстояние, на которое должен распространиться расплавленный припой под действием силы тяжести и капиллярных сил.

После того как заготовка припоя сконструирована, следует изготовить несколько ее образцов и провести их испытания в лабораторных условиях. В качестве эквивалентов колец и шайб могут служить полые валики или другие круглые предметы. Для изготовления дисков и шайб можно воспользоваться фольгой, для имитации шариков — небольшими кусочками проволоки.

Объем заготовки, имеющей цилиндрическую форму, легко вычислить на основе двух ее размеров — диаметра и высоты цилиндра. Объем шайбы определяется как разность объемов дисков большого и малого диаметров, причем последний равен диаметру отверстия. Кольцо образовано изгибом цилиндра, диаметр которого равен высоте кольца. Соответственно высота H равна:

$$H = \frac{D_H + D_B}{2}. \quad (5.1)$$

Пример расчета заготовки припоя. Вал сплошного сечения диаметром $d_v=12,7$ мм нужно соединить с втулкой, имеющей диаметр $d_n=13,0$ мм соответственно, пользуясь заготовкой припоя с набивкой из активированной канифоли. Высота втулки 6,5 мм. Необходимо рассчитать заготовку припоя для пайки данного соединения (рис. 5.7).

а) Идеальный спай в форме шайбы будет иметь следующие размеры: внутренний диаметр $d_g = 12,7$ мм, наружный диаметр $d_H = 13,0$ мм, длина спаия $L = 6,5 + 0,5 = 7,0$ мм (к высоте шайбы добавляется высота мениска галтели).

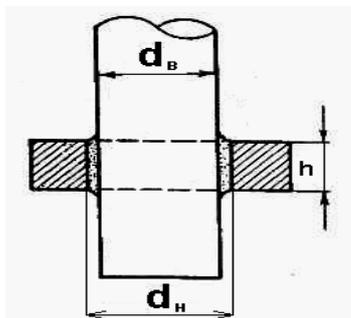


Рис. 5.7. Схема паяного соединения вала с втулкой

б) Идеальный объем по наружному диаметру $d_H = 13,0$ мм и $L = 7,0$ мм составит $V_1 = 929$ мм³. При внутреннем диаметре $12,7$ мм и $L = 7,0$ мм объем цилиндра $V_2 = 886$ мм³. Идеальный объем спаия:

$$V_c = V_1 - V_2 = \frac{1}{4} \pi L (d_H^2 - d_g^2) = 43 \text{ мм}^3. \quad (5.2)$$

в) Кольцо трубчатого припоя, содержащего флюс в количестве 20%, имеет общий объем $V_k = V_c \times 1,2 = 51,6$ мм³

г) Диаметр кольца припоя в соединении

$$d_k = \frac{d_n + d_g}{2} = \frac{13,0 + 12,7}{2} = 12,85 \text{ мм}. \quad (5.3)$$

д) Исходя из рассчитанного объема кольца в форме тора и его диаметра находим диаметр припоя

$$D = \sqrt{\frac{V_k}{2,467 d_k}} = 1,27 \text{ мм} \quad (5.4)$$

Выбираем ближайший стандартный диаметр трубчатого припоя 1,3 мм.

5.4. Формирование матричной структуры выводов припоя

Технологии формирования матричной структуры выводов припоя (рис. 5.8) (реболлинг) подразделяются на пять основных групп: наращиванием, погружением в расплав, дозированием жидкого припоя, переносом шариков в твердом состоянии и с помощью паяльной пасты [5]. Наращивание выводов осуществляют либо в сухой среде термовакuumным испарением либо в жидкой среде гальваническим осаждением.

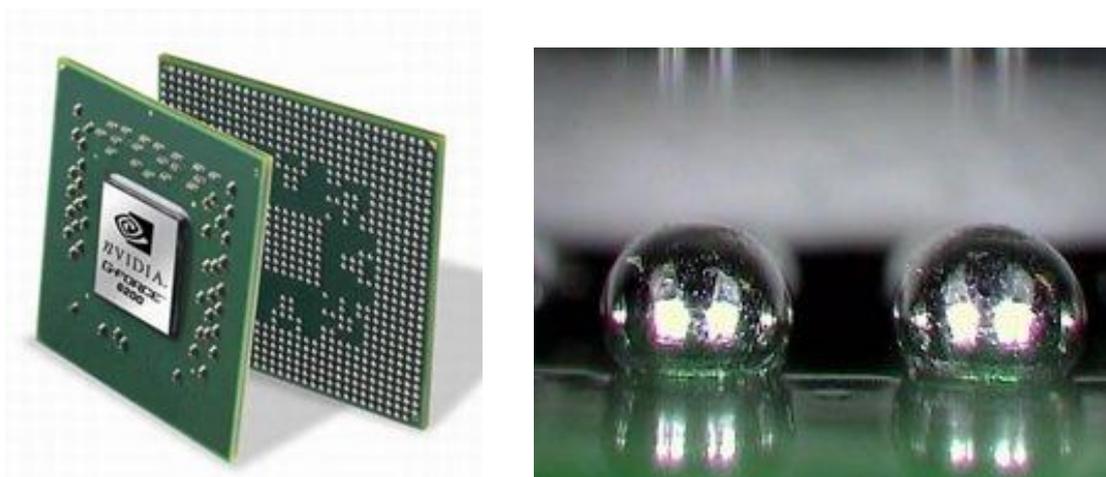


Рис. 5.8. Матричная структура выводов (а) и шарики припоя (б) в качестве ВЫВОДОВ

В первом методе на полупроводниковую пластину устанавливают молибденовую металлическую маску с отверстиями, симметрируя их относительно контактных площадок (рис. 5.9). Металлический слой наносят в несколько стадий: вначале на контактную площадку из Al напыляют адгезионный и барьерный слой из хрома толщиной 0,15 мкм и сплава CrCu 50/50 толщиной 0,15 мкм, затем слой меди толщиной 1 мкм и золота толщиной 0,15 мкм, после чего осаждают определенное количество припоя. После нанесения припоя молибденовую маску убирают и оплавливают припой в виде шарика.

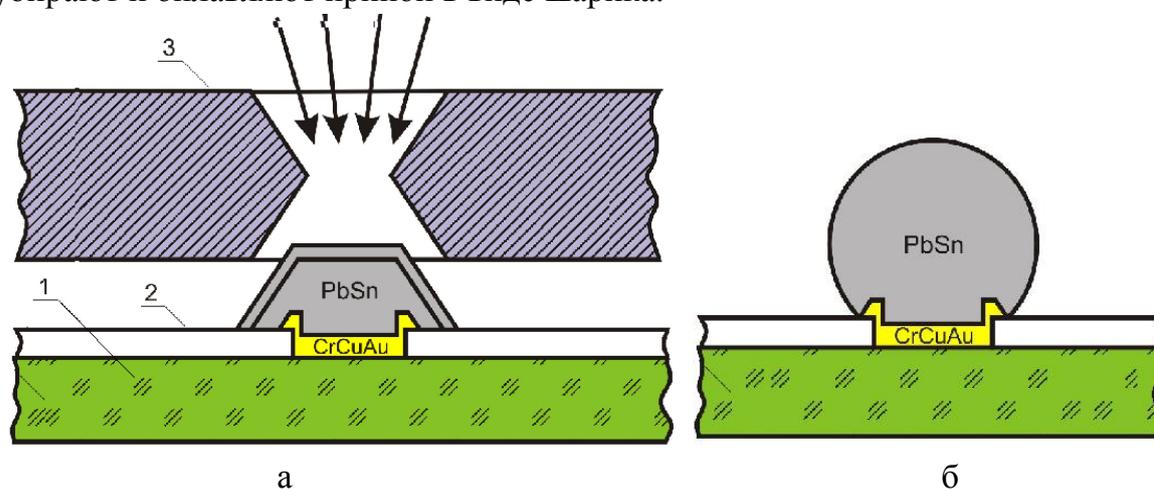


Рис. 5.9. Схема напыления (а) и оплавления припоя

Стоимость процесса термовакуумного осаждения высока, и он позволяет формировать выводы с большим шагом из-за ограничений технологии металлической маски.

Во втором методе пластину вначале покрывают слоем металла, после чего наносят фоторезист, оставляя открытыми участки, где должны располагаться выводы (рис. 5.10). Затем электролитически осаждают последовательно слой меди и припоя Sn-Pb на контактных площадках. После нанесения припоя, металл, по-

крывающий пластину, стравливают, а осажденный припой оплавляют с применением флюса.

Данный метод обладает большей производительностью, однако повторяемость диаметров шариков не высока. Это можно объяснить как наличием загрязнений в припое, так и различной рассеивающей способностью электролитов. Технологию формирования шариковых выводов погружением в расплавленный припой применяют в случаях, когда необходимо нанести небольшое количество припоя, например, для компонентов Flip chip, монтируемых на гибкий носитель. Для формирования выводов на полупроводниковой пластине в качестве базового слоя для смачивания применяют никелевое покрытие, наносимое химическим осаждением.

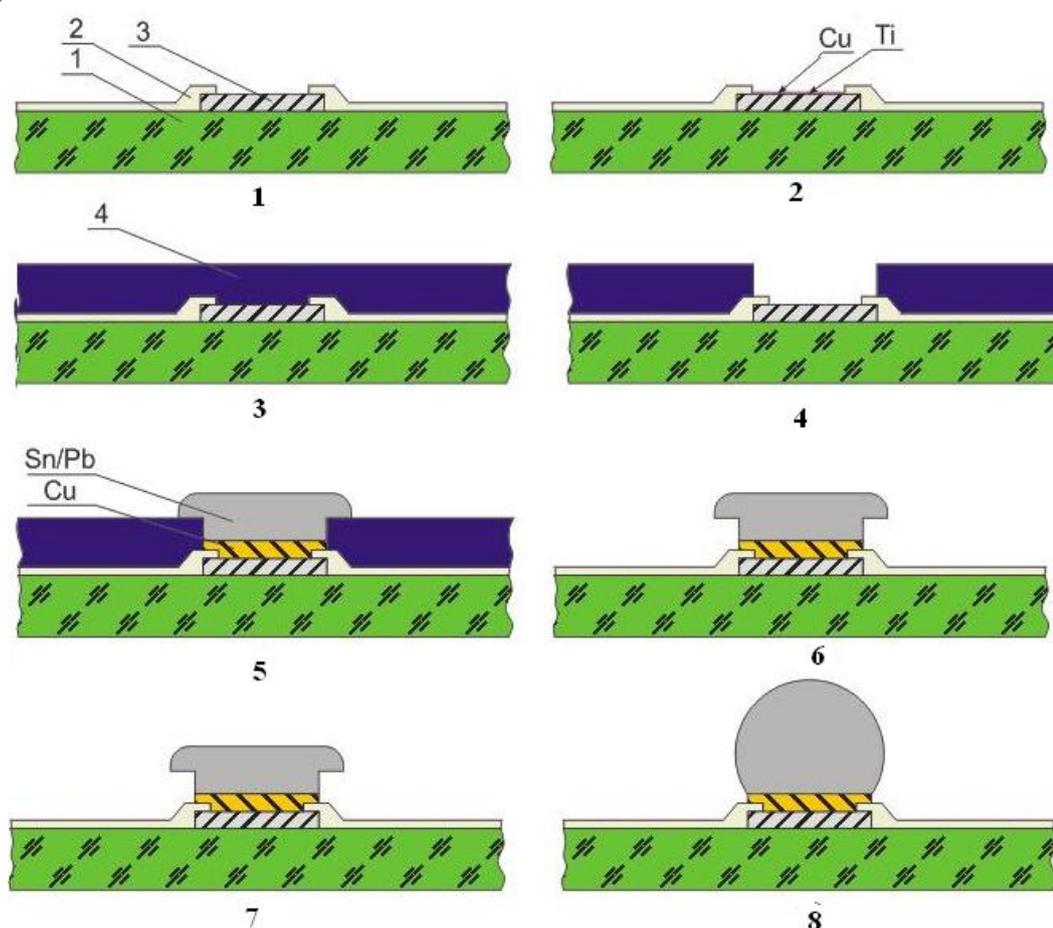


Рис. 5.10. Гальваническое осаждение припоя на контактные площадки

Для формирования выводов из припоя на алюминиевых контактных площадках кристалла применен процесс химического осаждения слоя никеля 2 мкм и ультразвуковая (УЗ) пайка [6]. Кремниевая пластина диаметром 120 мм имела контактные площадки площадью 100 мкм² со слоем алюминия толщиной 1,0 мкм.

На кристалле размером 3,5x5,0 мм располагалось 78 контактных площадок. Пластина активировалась Pd после промывки в серной кислоте, затем в воде. При этих условиях пористый слой Pd толщиной 500 Å селективно осаждался на

площадках по реакции $\text{Pd}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Pd}$. После промывки водой, формировался слой Ni-P толщиной 2 мкм на слое Pd химической металлизацией. Далее пластина выдерживалась при температуре 150°C в течение 30 минут.

Кремниевая пластина 1 погружалась в волну припоя 2, создаваемую мотором 3, при температуре 220–240°C (рис. 5.11). УЗ колебания частотой $16,5 \pm 2$ кГц от преобразователя 4 вводились в волну припоя с помощью наконечника и одновременно в эту область подавался защитный газ–азот со скоростью до 5 л/мин для снижения окисления припоя.

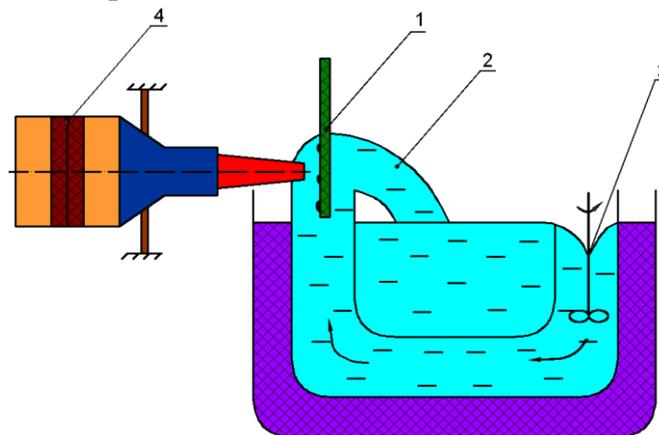


Рис. 5. 11. Схема формирования столбиков припоя УЗ пайкой

Пластина погружалась в жидкий припой таким образом, чтобы контактные площадки находились напротив УЗ излучателя для формирования первой ступени столбика, для чего применялся припой 99Pb-1Sn с температурой пайки 360–400°C. Затем пластина погружалась в припой Sn-37Pb при температуре 200–240°C для формирования второй ступени столбика припоя. Высота столбиков после первого этапа находилась в пределах 12–16 мкм, после второго этапа– 18–22 мкм. Средняя прочность на отрыв после первого этапа составила 20 г на площадку, а после второго–26,8 г. На межфазной границе формируется интерметаллид Ni-Sn, который приводит к хорошей надежности соединения.

Дозирование расплавленного припоя при формировании шариковых выводов осуществляют под действием УЗ вибраций, которые от пьезокристалла в виде механических импульсов передаются в дозатор припоя, в отверстии которого образуются капли диаметром 0,75 мм (рис. 5.12). Используя пластину из графита с отверстиями, точно соответствующими расположению контактных площадок на подложке BGA, можно за один цикл формировать до 400 выводов на подложке, нагретой до 180°C. Процесс дозирования жидкого припоя превращает расплавленный припой непосредственно в шариковый вывод, исключая промежуточные операции, необходимые в других методах. Данный метод является самым недорогим, однако имеет ограничения по производительности и нестабильность размеров шариков припоя.

Индукционный нагрев применен для формирования шариков бессвинцового припоя диаметром 0,76 мм на контактных площадках платы, имеющих покрытие никелем 10 мкм и золотом 0,05 мкм. Шарики вручную размещались на подложке, а затем вместе с подложкой нагревались в центре витка индуктора (рис. 5.13). Частота тока составляла 300 кГц, величина тока варьировалась от 11 до 29 А. Температура оплавления припоя достигалась при токе индуктора 17 А за 12 с и токе 27 А за 3с [7]. Затем шарики припоя были использованы для присоединения БИС в корпусе BGA к контактным площадкам платы.

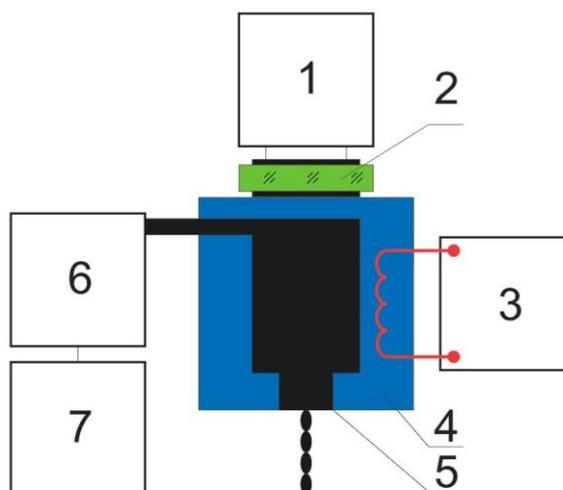


Рис. 5.12. Дозатор капель жидкого припоя: 1–генератор, 2–пьезокристалл, 3–регулятор температуры, 4–дозатор, 5– калиброванное отверстие, 6 – подача припоя, 7– емкость с азотом

Перенос шариков в твердом состоянии возможен как ручным методом, так и с помощью автоматов. В первом случае шарики переносят вакуумным пинцетом, используя для их захвата пластмассовые иглы. Перенос шариков осуществляют на контактные площадки с предварительно нанесенной паяльной пастой. Обязательным условием этого процесса является 100%-ный видеоконтроль захвата шариков, так как в случае его отсутствия вакуум засасывает паяльную пасту в иглу и возникает проблема с дозированием пасты. Недостатком является утомляемость оператора и невысокая точность позиционирования.

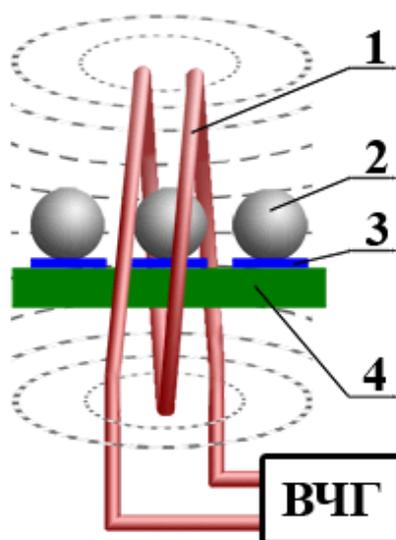


Рис. 5.13. Схема индукционного нагрева для формирования шариков припоя: 1–индуктор, 2–шарик, 3–контактная площадка, 4– плата

При большом количестве шариков (более 250) возможно применение автомата установки SMD MY9 (MYDATA), инструменты которого позволяют захватывать и устанавливать компоненты размером 01005, близкие по размерам к шарикам припоя диаметром 0,6 мм. Проблема видеоконтроля осталась, скорость установки снизилась (для 1156 шариков время установки составило около 40 мин) [8].

Матричную структуру шариковых выводов можно формировать, используя паяльную пасту и трафаретную печать. Этот метод отличается высокой производительностью и снижением расходов на формирование выводов. Конструкция трафарета в этом процессе – один из важнейших моментов. Для нанесения достаточного объема паяльной пасты при формировании шарикового вывода заданного диаметра размеры окон в трафарете выбирают значительно большими, чем размеры контактных площадок. Однако этот вариант трафарета подходит для компонентов с периферийным расположением выводов или расположением выводов в шахматном порядке.

При расположении контактных площадок по всей поверхности компонента расплывание отпечатков паяльной пасты при увеличенных окнах в трафарете может привести к перетеканию припоя и образованию короткозамкнутых перемычек и к формированию выводов разного размера. В этом случае для получения необходимого объема припоя на контактных площадках используют более толстые металлические трафареты (100–200 мкм) с квадратной формой апертур со скругленными углами и 5° уклоном стенок. Потенциальной проблемой в данном случае является возможность застревания пасты в окнах трафарета. Поэтому рекомендуется применять паяльную пасту с более мелкими частицами припоя (менее 25 мкм), что особенно важно при уменьшении шага выводов.

Другой проблемой при использовании металлического трафарета является необходимость очень аккуратного его отделения от платы во избежание перепол-

зания пасты. Для отделения трафарета применяют механизированные приспособления, включающие устройство натяжения трафарета и микролифт для точного отделения его от платы после нанесения пасты.

Одним из распространенных вариантов нанесения паяльной пасты на контактные площадки под BGA является использование одноразовых полимерных гибких трафаретов с клейкой нижней поверхностью. Трафареты изготавливаются с помощью лазера из антистатической полимерной пленки с клейким покрытием обратной стороны, не оставляющим загрязнений на поверхности платы. Выпускаются трафареты под различные корпуса, количество, шаг, размер и расположение шариковых выводов. Клеевое уплотнение вокруг каждой контактной площадки BGA препятствует затеканию пасты под трафарет при ее нанесении. В противоположность металлическим трафаретам, при наличии локальных искривлений платы гибкий клеящийся трафарет будет плотно прилегать к ее поверхности, повторяя форму изгиба. Наличие отогнутых бортиков по четырем сторонам трафарета препятствует загрязнению поверхности платы паяльной пастой при ее избыточном нанесении или неосторожном перемещении ракеля.

Другим вариантом ручной установки BGA-компонентов являются специализированные ремонтные полиимидные трафареты StencilQuick™, которые являются одноразовыми и несъемными, т.е. после нанесения пасты, установки компонента на плату и пайки оплавлением становятся неотъемлемой частью сборки.

5.5. Ограничение площади растекания припоя

При пайке электронных сборок широко применяют защитные покрытия. По их функциям эти покрытия можно разбить на две основные группы: защитные маски и покрытия для паяных соединений. Защитные маски, обычно из эпоксидных смол, наносят на участки поверхности детали, на которых смачивание нежелательно. Примером может служить печатная схема с узкими полосками изоляторов и сложно переплетенной схемой проводников, в которой образование металлических перемычек совершенно недопустимо. Если такую схему селективно перекрыть защитным материалом, так что свободными останутся лишь те участки, к которым необходимо припаивать детали, то возможность образования перемычек полностью устраняется.

Экранирующие материалы обычно изготавливаются на базе эпоксидных смол и наносятся наложением пленки, напылением и кистью. Покрытие до пайки необходимо подвергать отверждению, после чего оно может выдерживать рабочие температуры пайки, не теряя своих защитных свойств в течение достаточно долгого времени. Нет необходимости говорить о том, что поверхность перед нанесением покрытия необходимо тщательно очищать. Не менее важно предварительно проверить совместимость покрытия с используемым флюсом. В некоторых случаях флюсы, несовместимые с материалом покрытия (в особенности с аминами), вызывали отслаивание и разрушение материала маски со всеми выте-

кающими отсюда последствиями (сказанное относится к большинству не эпоксидных материалов). Маски, служа барьером между атмосферой и печатной схемой, обладают еще и дополнительным преимуществом, устраняя опасность коррозии и утечки тока. Дополнительная стоимость маски компенсируется уменьшением расхода припоя при пайке и тем, что можно применять медную проводку без оловянно-свинцового или какого-либо другого защитного покрытия.

Одним из самых существенных недостатков масок является то, что в случае их применения ремонт схемы сильно затрудняется. Для того чтобы провести ремонтную пайку, маску необходимо соскоблить или удалить каким-либо другим способом. Большинство выпускаемых промышленностью растворителей для эпоксидных смол вредно действует на детали электронного оборудования.

В настоящее время для печатных плат и поверхностного монтажа используют фотоэкспонируемые паяльные маски с водощелочным проявлением, отличающиеся высокой химической стойкостью. Такие маски светло-зеленого или темно-зеленого цвета содержат до 76% твердой составляющей и гарантируют толщину покрытия 25 мкм. Маски после нанесения экспонируют в течение 20–30 с при мощности ламп 5 кВт. Проявление происходит в 1% растворе карбоната натрия, после чего следует тепловое отверждение. Маски выдерживают термоудары в количестве 100 циклов от -65 до $+125^{\circ}\text{C}$ и стойкость к воздействию припоя в количестве не менее 5 циклов.

Для ограничения количества припоя на печатных проводниках в технологии массовой пайки применяют паяльные маски в виде сухой фотополимерной пленки, наносимой на поверхность платы вакуумным ламинированием и экспонируемой ультрафиолетовым излучением. Маска типа ВАКREL фирмы Du Pont (США) матово-зеленого цвета обладает хорошей адгезией к поверхности платы, устраняет образование перемычек припоя и защищает печатный монтаж от климатических воздействий. Маски выпускаются толщиной 50, 75 и 100 мкм и обеспечивают геометрию паяных соединений с фотографической точностью.

В настоящее время в связи с невысокими потребительскими свойствами сухих пленочных паяльных масок возрос интерес к применению жидких фоточувствительных масок, наносимых сеткографической печатью. Для обеспечения высокой повторяемости рисунка и хорошего разрешения необходимо выполнить ряд требований: рекомендуемый тип сетки–100–125 ячеек на дюйм (39–49 на см), угол наклона ракеля– $22,5^{\circ}$, время сушки– не более 70–80 мин при 80°C , толщина маски в сухом виде–10–20 мкм, плотность энергии экспонирования–150–400 мДж/см², время реакции полимеризации после экспонирования 10–15 мин [9]. При обработке печатных плат в установке горячего лужения (HASL), а также при волновой пайке на поверхности маски могут образовываться шарики припоя, приводящие к образованию перемычек. Использование масок с матовой поверхностью снижает количество образующихся шариков припоя.

Защитные покрытия наносятся на выполненные паяные соединения после их тщательной промывки и удаления флюса. Назначением покрытия является сохранение чистоты поверхности после пайки, в особенности в электронных и электротехнических узлах. Химически чистую поверхность паяного узла, полученную после удаления флюса, необходимо защитить от последующих воздействий. Прикосновение потных рук, контакт с запыленной средой, в которой работают бытовые или производственные приборы,— все это может повлиять на качество большинства печатных схем.

Материалы покрытий паяных соединений отличаются от материалов масок тем, что первые благодаря подбору компонентов допускают пайку без удаления покрытия с проводников. Это обстоятельство весьма ценно с точки зрения возможности ремонтной пайки. Защитные покрытия также служат барьером для влаги, и ее конденсация не может повлиять на надежность соединения. В этом отношении они аналогичны лакам, наносимым на электролитически осажденные декоративные покрытия. Наносят защитные покрытия обычными способами: пульверизатором, кистью или погружением. В качестве защитного покрытия применяют химический никель толщиной 3–5 мкм, осаждаемый по селективной технологии.

Защитные покрытия используют не только в электронной промышленности. В конструктивных паяных соединениях серьезную опасность представляет образование электродного потенциала между припоем и основным металлом. В данном случае покрытия служат барьером для влаги, чтобы предотвратить возникновение коррозионных электрохимических элементов. В этом отношении нанесение защитных покрытий аналогично окрашиванию.

5.5. Нанесение паяльных паст

Для нанесения паяльной пасты применяют два метода: дозирование и трафаретную печать. Дозирование используется в многономенклатурном мелкосерийном производстве и при ремонтных работах. Паяльную пасту наносят с помощью ручных или автоматических дозаторов. Объем дозы паяльной пасты зависит от внутреннего диаметра иглы дозатора (рис. 5.8,а), величины прилагаемого давления и времени дозирования. Внутренний диаметр иглы должен не менее чем в 10 раз превышать максимальный диаметр частиц в пасте и выбирается в пределах от 0,25 до 2 мм. При ручном нанесении пасты иглу дозатора рекомендуется размещать под углом 30–60° к плоскости платы, а подъем иглы после нанесения дозы пасты осуществлять строго вертикально. Производительность ручного дозирования для опытных операторов составляет до 120 доз/мин.



Рис. 5.8. Схема дозирования паяльной пасты (а) и ручной дозатор (б):
1 – воздух под давлением, 2 – поршень, 3 – паста, 4 – игла

Ручной цифровой дозатор DX-200 конструктивно выполнен в виде настольного блока позволяет наносить дозы паяльной пасты с высокой точностью и повторяемостью (рис. 5.8,б). DX-200 может комплектоваться вакуумным пинцетом, для размещения поверхностно-монтируемых компонентов на печатные платы, а также может быть дооснащен выносным малогабаритным бесшумным компрессором, благодаря которому функционирует без подключения к внешней пневмосети. При автоматическом дозировании давление выбирают в пределах 3–6 бар, длительность времени импульса давления 0,5 с, производительность при этом достигает 500 доз/мин.

Трафаретный метод является наиболее распространенным методом нанесения паяльной пасты. Нанесение паяльной пасты на контактные площадки печатной платы производится на устройстве трафаретной печати через специальный трафарет. Трафарет представляет собой металлическую фольгу (латунь, нержавеющая сталь) толщиной 0,2–0,35 мм с отверстиями (прямоугольными или круглыми), соответствующими контактными площадкам печатной платы. Максимальная длина окна равна

$$L_p = d + \frac{0,075}{W_p - d} , \quad (5.5)$$

где d – толщина трафарета, W_p – минимально допустимый размер окна.

Трафарет закрепляется на устройстве трафаретной печати, под ним на базовых штырях устанавливается печатная плата, затем отверстия трафарета совмещаются с контактными площадками печатной платы. Припойная паста, нанесенная на трафарет, с помощью ракеля (металлического, резинового или полиуретанового) продавливаются через окна трафарета на контактные площадки печатной платы.

Толщина нанесенного слоя припойной пасты (рис. 5.9) равна:

$$t_{nc} = t_c k + t_3, \quad (5.6)$$

где t_{nc} – толщина нанесенного слоя пасты (во влажном состоянии); t_c – толщина сетки; t_3 – толщина эмульсии; k – коэффициент прозрачности сетки. Параметры трафаретных сеток приведены в табл. 5.3.

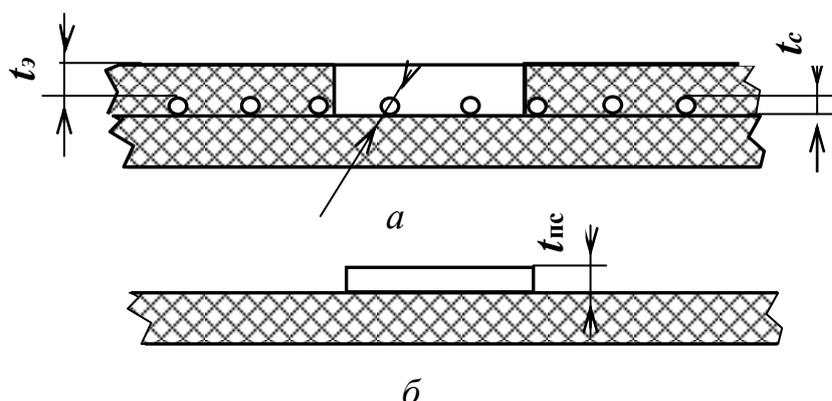


Рис. 5.9. Схема для расчета толщины слоя пасты, наносимой через сетчатый трафарет: до нанесения пасты (а), после нанесения (б)

Таблица 5.3 Параметры сеток для трафаретов

Материал сетки	Число ячеек на 25 мм	Диаметр провода, мкм	Размер окна, мкм	Коэффициент прозрачности k	Толщина слоя, мкм
Полиэстер	45	50	210	0,68	74
Нержавеющая сталь	80	45	265	0,71	110

Минимально допустимый размер окон должен превышать максимальный диаметр припойных шариков в пасте. Учитывая реологические свойства пасты, этот размер зависит от толщины трафарета. Стандартная толщина трафарета – 200 мкм. Для компонентов с малым шагом $P > 0,4$ мм используют трафареты ступенчатой формы. Расход паяльной пасты определяют как:

$$H = Y \times d \quad (5.7)$$

$$Y = \frac{100 \times \rho}{(100 - M) \times \rho + M} \quad (5.8)$$

где H – расход паяльной пасты, мг/мм², Y – плотность пасты, d – толщина трафарета, ρ – плотность припоя в паяльной пасте, M – процентное содержание металлической составляющей в пасте.

Пример. Паяльная паста Sn62RM92A содержит $M=90\%$, $\rho=8,5 \text{ г/см}^3$. Тогда $Y=4,86 \text{ г/см}^3$, $H=4,86 \cdot 0,20=0,97 \text{ мг/мм}^2$.

В отличие от технологии ГИС при поверхностном монтаже используют металлические ракель ромбовидного или прямоугольного сечения с алмазным покрытием, что обеспечивает качественное нанесение пасты на платы больших площадей и большую износостойкость их рабочих поверхностей (рис.5.10).

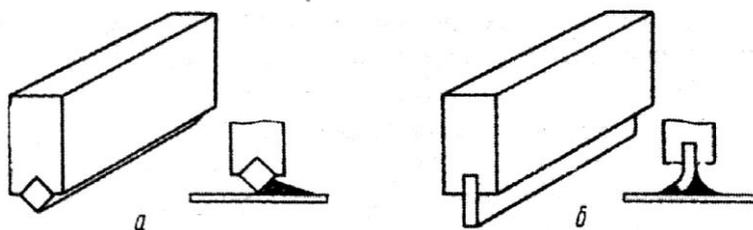


Рис. 5.10. Виды ракелей для нанесения паст: припойных (а) и резистивных (б)

В мелкосерийном производстве для ручного нанесения паяльной пасты через металлические трафареты применяют устройства SD-240, SD-360 с размерами рабочего поля 240x180 мм и 360x260 мм соответственно. Отличительные особенности: легкое крепление трафарета по двум краям, регулировочные винты для подстройки положения трафарета относительно печатной платы по осям X, Y и углу и натяжения трафарета (рис. 5.11). Печатная плата фиксируется держателями на магнитной основе, что позволяет быстро переходить на другой тип плат. Эта особенность в сочетании с быстрой заменой трафарета делает устройства удобными в производстве.



Рис. 5.11. Устройство трафаретной печати паяльной пасты начального уровня

Автомат трафаретной печати ELA (рис. 5.12) обеспечивает высокую производительность для изделий с большим количеством компонентов, высокую гибкость и точность нанесения пасты. Компьютерное управление в сочетании с программированием в среде Windows® NT делает автомат удобным в управлении и позволяет оператору быстро обучаться. Вмешательство оператора в процесс работы автомата сведено к минимуму за счет наличия в нем автоматиче-

ских коррекции по реперным знакам, регулировки ширины конвейера, нанесения паяльной пасты на трафарет, проверки наличия паяльной пасты на контактных площадках и активизации системы очистки трафарета. Время цикла нанесения пасты на платы с максимальными габаритными размерами 510x508 мм – 16с. Скорость движения ракеля регулируется в пределах 2–150 мм/с.



Рис. 5.12. Автомат трафаретной печати пасты ELA

Повышение плотности монтажа и уменьшение размеров контактных площадок, а также переход на бессвинцовые паяльные пасты, ужесточают требования к точности и повторяемости параметров процесса нанесения пасты трафаретной печатью при условии обеспечения высокой производительности: время цикла не более 14,5 с, повторяемость 25 мкм & 4 сигма, диапазон скорости ракеля 2–150 мм/с, давление ракеля 0–20 кг.

5.6. Методы очистки от остатков флюса

Как правило, после пайки на плате остается еще некоторое количество флюса и продуктов его разложения. Они могут вызвать коррозию, ухудшить электрические параметры схемы, деградацию паяных соединений. Необходимость очистки платы после пайки решается в зависимости от требуемой степени надежности аппаратуры, условий ее эксплуатации, назначения изделия. При использовании защитных масел очистка обязательна во всех случаях. Для отмывки плат применяют различные растворители и составы, включая воду. Моющие составы должны быть способны растворять как связующее вещество, так и основной материал флюса.

Отмывка электронных модулей на печатных платах представляет довольно сложный химический процесс, в результате которого могут возникать такие проблемы, как: неполное удаление остатков флюса, удаление маркировки с компонентов, белый налёт, повреждение электронных компонентов, избыток влаги

на платах после сушки. При поверхностном монтаже необходимо отмывать трафареты, поскольку их чистота является решающим фактором для качества трафаретной печати. Загрязненные апертуры приводят к серьезным ошибкам печати, а это напрямую отражается на качестве сборки. Современные требования к высокому качеству трафаретной печати, связанные с использованием таких корпусов, как BGA, QFP, CSP и других с большим числом выводов и малым шагом. Это повышает требования к качеству отмывки после пайки.

Удаление остатков канифольных флюсов осуществляют спирто-бензиновой смесью, трихлорэтиленом, четыреххлористым углеродом. Процесс отмывки в спирто-бензиновой смеси происходит в трех ваннах с применением агитации раствора барботажем, вибрациями и др. Время отмывки обычно составляет 10–15 мин на плату, одновременно может отмываться 5–10 плат. Срок эффективного действия раствора в среднем 3 дня, после чего необходима его утилизация. Спирто-бензиновая смесь плохо удаляет ионные водорастворимые компоненты, оставляет белый налет на поверхности и характеризуется высокой токсичностью и пожароопасностью.

Очистка плат после пайки с применением водорастворимых флюсов проводится горячей водой (50–60⁰С) с добавками поверхностно-активных веществ (ПАВ). Очистка выполняется по следующей схеме: очистка в моющей среде - 10 мин, 60⁰ С, стекание раствора - 0,5 мин, ополаскивание в воде - 5 мин, 60⁰С, ополаскивание в деионизованной воде - 5 мин, 25⁰С, предварительная сушка - 30 мин, 60⁰С, окончательная сушка - 180 мин, 25⁰С. Эта технология позволила избавиться от спирто-бензиновой смеси, а также предотвратить загрязнения окружающей среды парами органических растворителей.

Альтернативой органическим растворителям и хладагентам является УЗ очистка в водных растворах ПАВ. Воздействие УЗ полей на жидкие среды вызывает в них процессы кавитации, а также макро- и микропотоки в объеме жидкости, прилегающей к излучаемой поверхности ванны. Захлопывание кавитационных газовых полостей сопровождается образованием ударных микроволн, давления в которых могут достигать $(1-5) \cdot 10^8$ Па. Такие микроудары разрушают не только оксидные пленки и загрязнения на обрабатываемой поверхности изделий, но и в определенной степени изменяют морфологию поверхности. Возникающие микро- и макропотоки способствуют удалению загрязнений и ускорению процесса очистки микрорельефных поверхностей. Обусловленные кавитацией динамические и тепловые эффекты интенсифицируют процесс удаления загрязнений с поверхностей деталей и изделий под действием УЗ поля. Использование рабочих частот в диапазоне 80–120 кГц обеспечивает неразрушающую очистку и удаление загрязнений размером до 1 мкм с микрорельефных поверхностей.

Основными преимуществами УЗ очистки перед другими методами удаления загрязнений являются высокая производительность, сочетающаяся с хорошим качеством очистки изделий от любых поверхностных пленок. Наиболее производительным является групповой способ обработки мелких изделий, уложенных в кассеты или

корзины. Для высокого качества очистки необходимо создать направленные акустические течения и обеспечить равномерность распределения интенсивности УЗ поля в объеме жидкости.

В часто используемых конструкциях дном ванны служит излучающая диафрагма магнитострикционного преобразователя типа ПМС-6-22. Распределение акустического давления, создаваемого такими системами, крайне неравномерно – до 50%. В центре ванны над диафрагмой давление принимает максимальное значение и уменьшается к краю мембраны.

При УЗ очистке электронных модулей основным требованием, предъявляемым к УЗ технологическим системам, является высокая равномерность воздействия УЗ колебаний на изделия. Поэтому для возбуждения УЗ колебаний используют различное число пакетных пьезоэлектрических преобразователей (ППП) мощностью 50 – 100 Вт, закрепленных на боковых стенках и днище ванны в определенном порядке, с параллельным их подключением к генератору. В этом случае эффективность и устойчивость работы преобразователей зависит от ширины полосы преобразования, поскольку в большей степени перекрываются частотные диапазоны отдельных преобразователей, что позволяет скомпенсировать разброс их собственных резонансных частот.

По сравнению с линейным расположением ППП более перспективна модульная система распределенных ППП, установленных в шахматном порядке таким образом, что образуется решетка треугольной структуры с длиной стороны, кратной $n\lambda/\sqrt{3}$, где $n = 1, 2, 3\dots$; λ – длина УЗ волны в жидкой среде [10] (рис. 5.13). Такое расположение преобразователей создает равномерное по площади УЗ поле при трехфазном возбуждении за счет суперпозиции волн, излучаемых ППП, подключенными к разным каналам УЗ генератора. Расстояние между центрами в группе кратно длине волны λ распространяющихся в жидкости УЗ волн.



Рис. 5.13. Расположение УЗ преобразователей на вибропанели

Выходной сигнал канала представляет собой сумму трех гармонических ко-

лебаний с основной частотой ω и боковыми частотами $(\omega + 100)$ Гц и $(\omega - 100)$ Гц. Поскольку автогенераторы питаются пульсирующим напряжением, то периодическое качание частоты способствует усреднению ближнего поля в результате периодического изменения интерференционной картины. Полные входные сопротивления групп преобразователей образуют вместе с компенсирующими индуктивностями резонансные контуры, определяющие рабочую частоту каналов генератора. Все изменения технологических условий (температуры и состава раствора, внесение кассеты с деталями в ванну) приводят к изменению полного входного сопротивления преобразователя, а значит и к изменению частоты генерируемых колебаний.

Выпрямители блоков питания каналов через понижающие трансформаторы подключены к соответствующим фазам трехфазной сети переменного тока, в результате чего сигналы на выходе каналов сдвинуты по фазе на 120° , а на преобразователи поступают группы импульсов УЗ колебаний, сдвинутые по фазе на тот же угол (рис. 5.14). Область наибольшего акустического давления, соответствующая максимальному напряжению на преобразователе, последовательно перемещается от преобразователя А к В и от В к С (или наоборот при перефазировке каналов) в каждой группе.

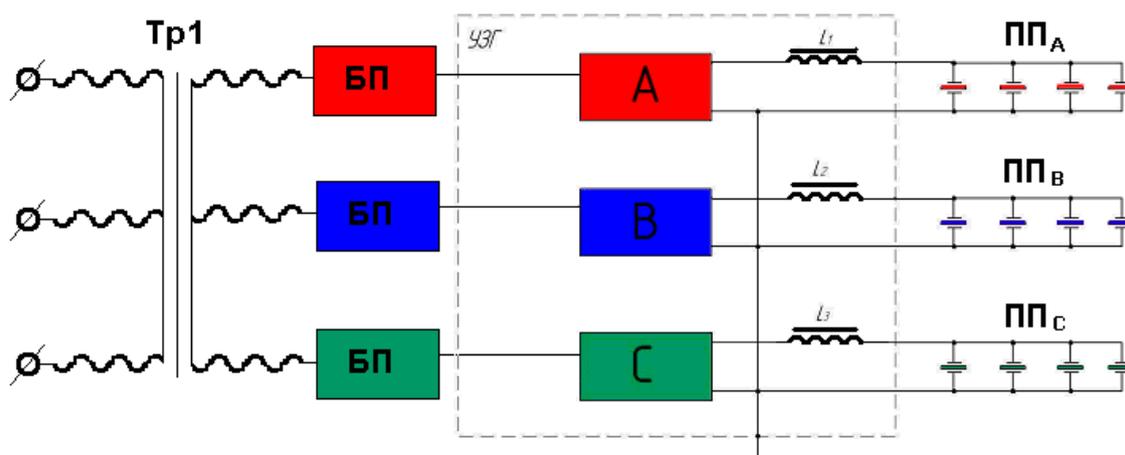


Рис. 5.14. Схема модульного УЗ генератора: А, В, С – каналы; L_1, L_2, L_3 – дроссели согласования; ППА...ППС – пьезоэлектрические преобразователи

В результате возникают направленные потоки жидкости из зоны большего акустического давления в зону меньшего давления. Так как движение областей происходит со сравнительно низкой частотой (100 Гц), то в жидкой среде с определенной вязкостью возникают вихревые макротоки, которые наряду с микропотоками, возникающими в вязком пограничном слое вблизи препятствий, интенсифицируют процессы массопереноса и растворения загрязнений.

УЗ установки для процессов удаления загрязнений включают различные по конструкции ванны, которые используются для очистки как в непроточных средах на основе водных растворов ПАВ, так и в проточной воде. Ванны для

очистки в проточных (рис. 5.15, а) и непроточных и моющих средах (рис. 5.15, б) отличаются тем, что первые оснащены переливным карманом. Для повышения эффективности обмена моющей среды в рабочем объеме ванны, подачу свежих порций раствора необходимо осуществлять противотоком сверху и снизу ванны через ряд отверстий небольшого диаметра (3–6 мм).

Верхний ряд отверстий должен быть затоплен на глубину 8–15 мм. Такая конструкция ванны для очистки в проточной среде обладает большой равномерностью распределения кавитационного давления, поскольку моющие потоки имеют практически ламинарный характер. Ёмкость ванн выбирается в зависимости от габаритных размеров обрабатываемой детали или при групповой очистке в зависимости от заданной производительности установки и необходимого времени очистки в каждой ванне. Основное требование, которое необходимо выполнять для обеспечения равномерного воздействия УЗ колебаний на объект очистки – кратность линейных размеров ванны в поперечном сечении $\lambda/2$, а оптимальная высота уровня моющей среды кратна λ .

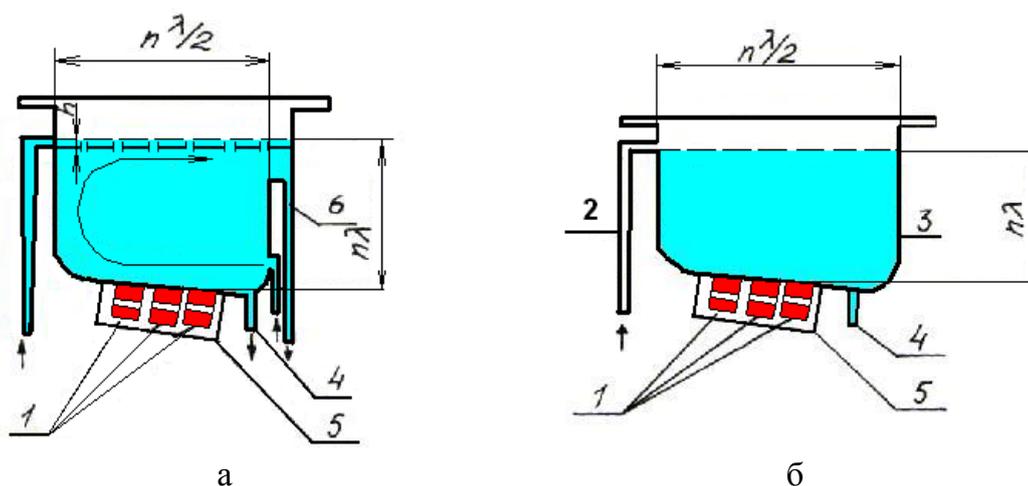


Рис. 5.15. Конструкции УЗ ванн: 1- ППП, 2 – переливной патрубков, 3 – корпус, 4 – сливной патрубков, 5 – экран; 6 – переливной карман

Ответственным моментом при проектировании УЗ ванн является выбор способа крепления ППП к ванне, так как это определяет долговечность ванны и эффективность её работы. ППП могут быть закреплены на стенках ванны с помощью эпоксидного компаунда (рис. 5.16, а), механически (рис. 5.16, б), сваркой (рис. 5.16, в), а также комбинированным способом (рис. 5.16, г). Наиболее технологичен комбинированный способ, который не создаёт зон скопления загрязнений и обеспечивает наиболее полную передачу УЗ колебаний в моющую среду. Поскольку в этом случае стягивающая шпилька приварена к стенке ванны, клеевой шов механически разгружен.

УЗ ванны изготавливают из коррозионно-стойких высоколегированных хромоникелевых сталей 12Х18Н10Т, Х18Н9Т или титановых сплавов ВТ-3, ВТ-41, которые обладают высокой химической кавитационной стойкостью, пластично-

стью при холодном деформировании и удовлетворительной свариваемостью, что облегчает качественное изготовление ванн любой степени сложности. УЗ ванны фирмы Elmasonic (рис. 5.17) имеют объем от 82 до 180 литров, подогрев жидкости от 30 до 80°C, мощность излучателей 1,8–3,2 кВт.

Для качественной отмывки активированных флюсов типа RM92 применяют систему отмывки UNICLEAN фирмы PBT, состоящую из четырех ванн (УЗ отмывки, две ванны ополаскивания и ванна сушки). Ванна отмывки оснащена УЗ излучателями с частотой 25 кГц и системой барботаж. Оптимальное время отмывки – 10 мин, активирующее воздействие ультразвука – 5 мин, барботаж – 5 мин при температуре 58°C.

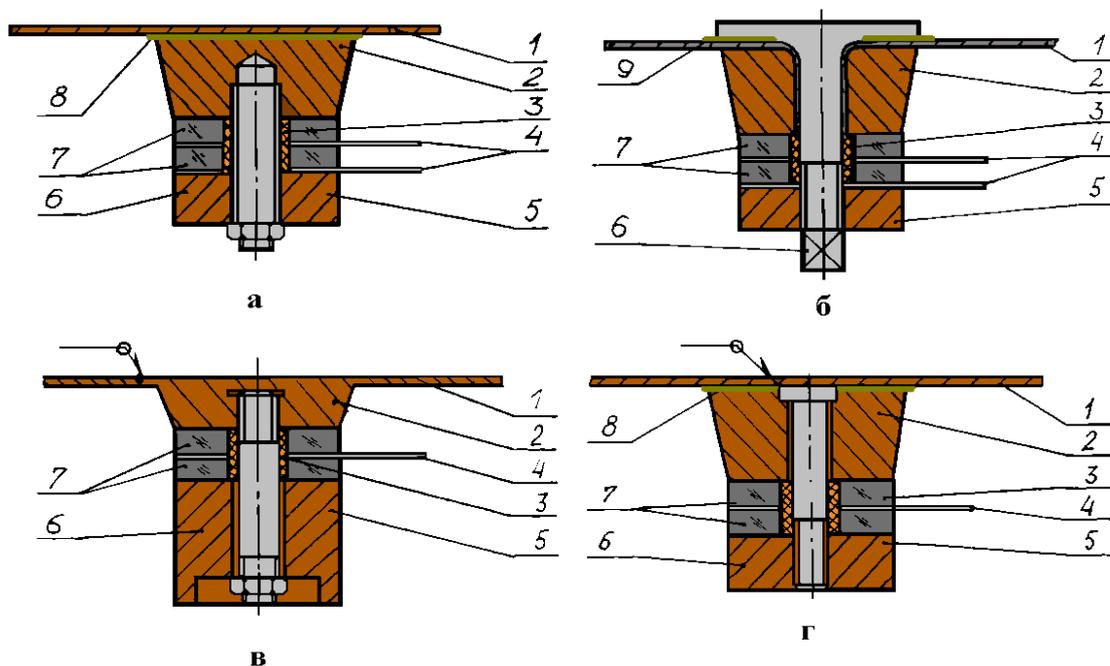


Рис. 5.16. Способы крепления ППП: 1 – стенка ванны, 2 – излучатель, 3 – изолирующая втулка, 4 – лепесток, 5 – отражатель, 6 – армирующий элемент, 7 – пьезопреобразователи, 8 – клей, 9 – прокладка

Предварительное ополаскивание – в проточной водопроводной воде без подогрева в течение 2 мин, а финишное – в деионизованной воде (проводимость 0,1 мкСм) при 25°C в течение 6 мин. Сушка осуществляется обдувом горячим воздухом 70–80°C в течение 10 мин.



Рис. 5.17. УЗ ванны TI-N-80 (а) TI-N-160 (б)

Некоторые электронные компоненты: кварцевые резонаторы, интегральные микросхемы и полупроводниковые приборы с проволочным монтажом и др. чувствительны к воздействию ультразвука. Компании Intel и др. рекомендуют для отмывки электронных модулей с интегральными микросхемами в пластмассовых корпусах следующие режимы: диапазон частот 40–66 кГц, максимальная плотность мощности ультразвука до 30 Вт/л, время отмывки – до 10 мин. Для того, чтобы быть абсолютно уверенным к пригодности электронных модулей к УЗ отмывке используют тестовый метод IPC–TM–650 № 2.6.9.2 «Определение чувствительности электронных компонентов к воздействию ультразвуковой энергии». Резонансная частота проволочных Al и Au выводов диаметром 30 мкм и длиной 3,0 мм в интегральных микросхемах составляет порядка 10 кГц и ниже. Поэтому чем ниже УЗ частота, тем агрессивнее воздействие кавитации [11]. Для устранения механических резонансов в проволочных соединениях и повышения равномерности УЗ поля в ванне рекомендуется режим качающейся частоты.

Кавитационное поле в жидкостях имеет сложный спектральный состав, поскольку в случайные моменты времени возникает и захлопывается множество пузырьков и вызванное ими акустическое излучение проявляется в виде широкополосного шума со спектром в полосе от нескольких сотен Гц до сотен кГц. На фоне сплошного спектра кавитационного шума наблюдаются отдельные дискретные субгармонические компоненты, отражающие частотный спектр поля, что является характерным признаком кавитации и используется для экспериментальной регистрации ее возникновения [12].

Спектральный анализ формы сигналов путем разложения в ряд Фурье [13] позволил выделить спектральные линии, соответствующие основной частоте воздействия, ее гармоникам nf_0 ($n=1, 2, 3$), субгармоникам $nf_0/2, nf_0/3, nf_0/4$ и ультрагармоникам колебаний полости. Акустическое давление обнаруживается в виде коротких импульсов, излучаемых при минимальных радиусах периодического движения; при этом их спектр является непрерывной функцией.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (5.9)$$

Помимо основной частоты и гармоник высоких частот nf_0 ($n=1, 2, 3, \dots$) в спектре содержатся серии субгармоник $nf_0/2, nf_0/3, nf_0/4$ и во всем диапазоне имеет место сплошной "белый" шум, генерируемый кавитационными пузырьками различных резонансных размеров.

Анализ спектрограмм показывает, что максимальный прирост в кавитационном спектре при увеличении излучаемой мощности дает сплошной шум, а также субгармоники. Наибольшая спектральная плотность кавитационного шума находится в полосе частот от 20-й до 40-й гармоники основной частоты ультразвукового преобразователя.

Для оценки интенсивности кавитационного давления в жидких средах предложено измерять квадратическую величину уровня шумов в полосе частот от 20-й до 40-й гармоники с помощью кавитометра, состоящего из датчика, полосового фильтра, квадратичного детектора и регистрирующего прибора [14]. Кавитометр (рис. 5.18) измеряет кавитационные давления от 5 до $5 \cdot 10^4$ Па в диапазоне частот 18–60 кГц с точностью $\pm 10\%$. Давление в кавитационной области воспринимается плоским диском 1 размером 1 см^2 , соединенным упругим волноводом 2 с пьезоэлектрическим преобразователем 3. Электрический сигнал с преобразователя поступает на усилитель 4, расположенный в корпусе датчика и служащий для его согласования с входом измерительного прибора. Атенюатор 5 ослабляет входной сигнал с датчика при большой мощности УЗ. Полосовой фильтр 6, выполненный по схеме Чебышева третьего порядка, выделяет часть спектра сигнала, характерную для кавитационных импульсов. Далее сигнал через среднеквадратичный детектор 8, усилитель постоянного тока 9 поступает на стрелочный прибор. Источник 10 питает измерительный прибор и датчик. Показания прибора (рис. 5.19, а) регистрируют через 1 – 2 с, когда процесс кавитации принимает устойчивый характер.

Для измерения характеристик шумового спектра и для оценки активности кавитации в мощных УЗ полях разработан прибор–индикатор активности кавитации. Принцип работы основан на анализе и обработке шумового спектра, возникающего в жидких средах при воздействии мощных УЗ полей. Индикатор состоит из электронного блока и широкополосного датчика с волноводом, сконструированного для работы при высоких температурах (рис. 5.19, б).

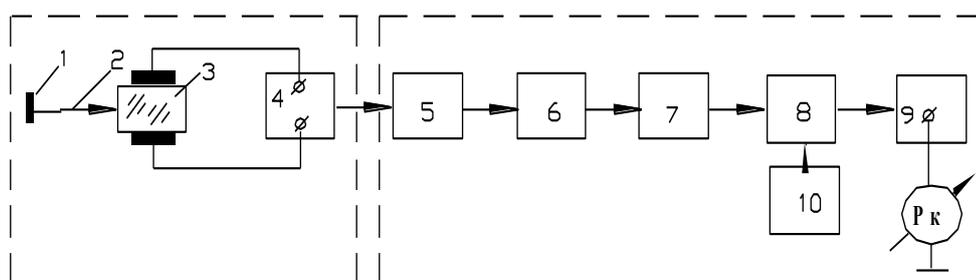


Рис. 5.18. Схема кавитометра

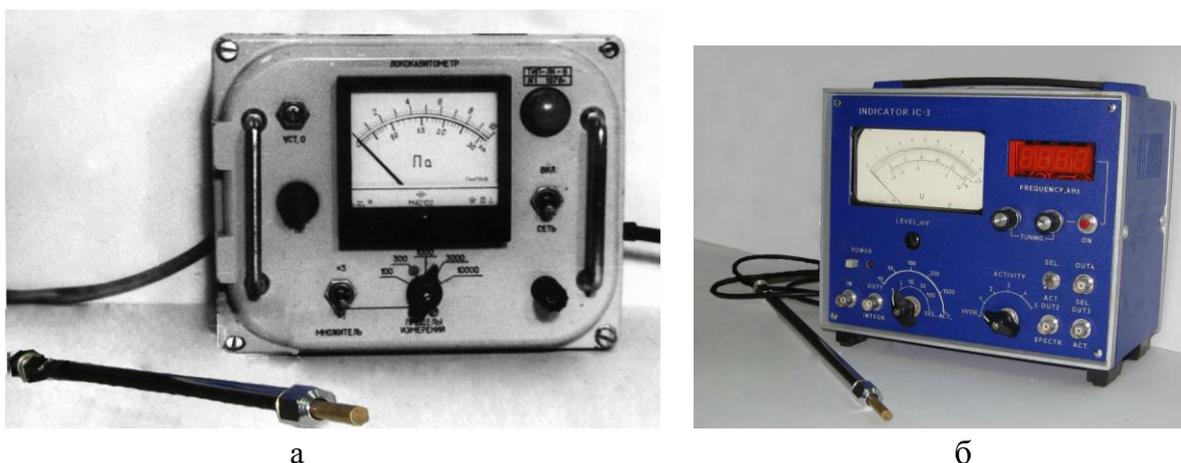


Рис. 5.19. Внешний вид кавитометра (а) и индикатора кавитации (б)

Кроме ультразвука для механической активации при отмывке широко применяются струи жидкости. Процесс отмывки выполняется за несколько стадий: струйная отмывка с применением жидкостей на водной или полуводной основе, ополаскивание в детонизованной воде в 2-х ваннах и вакуумная сушка. В системах отмывки NC25 (Франция) предусмотрена конвективная сушка с циклически создаваемым вакуумом, что позволяет снизить температуру сушки до не критичных для изделия значений [15].

Компания SYSTRONIC GmbH & Co.KG, специализирующаяся на производстве промышленных установок струйной отмывки, предлагает их для отмывки печатные платы после пайки или трафаретной печати, трафареты, ракели, паяльные рамки, паллеты, фильтры конвекционных печей и др. Струйный метод обеспечивает безопасную неповреждающую отмывку и позволяет отмыывать электронные модули с чувствительными компонентами.

Система струйной отмывки CL420 является универсальным решением для высокотехнологической отмывки. Отмываемые детали закрепляются в специальных рамках и загружаются в установку в вертикальном положении. Процесс отмывки осуществляется при помощи двух вращающихся форсунок и состоит из нескольких этапов: отмывка промывочной жидкостью, ополаскивание, сушка горячим воздухом. Установки CL420 имеют компактный размер и низкое энергопотребление (рис. 5.20,а) [16].

Система струйной отмывки CL900 позволяет проводить качественную отмывку печатных плат от остатков флюсов после пайки и других типов загрязнений, возникающих при производстве и монтаже печатных плат. Процесс отмывки состоит из следующих этапов: отмывка промывочной жидкостью, предварительное ополаскивание водой, финишное ополаскивание деионизированной водой с контролем уровня проводимости, сушка горячим воздухом с фильтрацией воздушного потока. Запатентованная конструкция четырехуровневой спрей-системы исключает появление теневых зон на отмываемых платах, что позволяет добиться полной и стабильной отмывки всех изделий, размещенных в корзине. Рабочая камера большого объема и универсальная двухуровневая корзина

уникальной конструкции позволяют отмывать одновременно 54 платы за один цикл. Благодаря высокой производительности и надежной конструкции установку CL900 можно использовать в условиях серийного производства при круглосуточной эксплуатации (рис. 5.20,б).



а



б

Рис. 5.20. Системы струйной отмывки: CL240 (а) и CL900 (б)

5.7. Контроль качества очистки поверхностей после пайки

Контроль качества очистки от остатков паяемых флюсов проводят визуальным осмотром под микроскопом типа МБС-2 с увеличением 8-10 раз, а также люминесцентным или кондуктометрическим методами. Люминесцентный метод контроля основан на явлении флуоресцентного свечения веществ, входящих в состав флюсов (канифоли, салициловой кислоты и др.). Источниками излучения при облучении платы являются лампы СВД-129А, ПРК-5 со светофильтром УФС-6. Наличие загрязнений определяют по видимому свечению остатков на поверхности платы в темной камере: голубое - для канифоли марки В и салициловой кислоты, желтое - для канифоли марки А. Точность метода до $1 \cdot 10 \text{ г/см}^2$.

Для получения высокого качества отмывки необходимо обеспечить контроль поверхностных загрязнений. Применяют прямые и косвенные методы определения органических и неорганических поверхностных загрязнений. Так, прямыми методами определяют загрязнения непосредственно на поверхности контролируемых изделий, а косвенные методы основаны на экстрагировании загрязнений растворителя с последующим анализом экстрактов физико-химическими или физическими методами, что позволяет обнаружить малые количества поверхностных загрязнений (табл. 5.4).

Таблица 5.4. Методы контроля поверхностных загрязнений

Метод контроля	Чувствительность,	Область применения
----------------	-------------------	--------------------

	мкг/см ²	
Люминесцентный: по свечению пленки	8–10	Контроль качества обезжиривания от минеральных масел, канифоли
с применением люми- нофора	1	Качественный контроль деталей с полиро- ванной поверхностью
Анализ экстракта за- грязнений в органиче- ских растворителях	0,2–0,3	Полуколичественный контроль качества обезжиривания
Кондуктометрический	0,1	Контроль процессов промывки деталей в воде после операций химической обработ- ки
Фотокалориметри- ческий	0,02–0,05	Определение ионов S^{2-} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- и др.

Кондуктометрический метод основан на измерении сопротивления дистиллированной воды до и после контрольной отмывки в ней проверяемых флюсов. Кондуктометрическим методом проводят контроль наличия остатков флюса путем измерения сопротивления дистиллированной воды до и после контрольной отмывки в ней проверяемых флюсов. Отмытую электронную сборку погружают в дистиллированную воду при температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$ и ополаскивают в течение 5 мин. В стакан с промывной водой емкостью 500–800 см³ погружают датчик и измеряют с помощью кондуктометрического концентратомера КК-3 удельное сопротивление воды, которое должно быть не менее $20 \cdot 10^3 \text{ Ом/см}^3$ [17].

Для экспресс контроля качества промывки применяют устройство, которое удаляет воздух из потока жидкости и концентрирует механические примеси в контрольном потоке, повышая тем самым чувствительность прибора к малому содержанию загрязнений в основном потоке жидкостей. Наиболее надежным в эксплуатации является вихревой метод, заложенный в основу конструкции разделительного аппарата—гидроциклона.

Автоматизация контроля трихлорэтилена по содержанию жировых загрязнений достигается применением малогабаритного электронного флуорометра ЭФ-ЗМА, в котором вмонтирована стеклянная проточная кювета, связанная с анализируемым прибором пробоотборником и позволяющая измерять степень флуоресценции. Остатки канифоли на плате определяют реакцией Шторха– Моравского с относительной погрешностью не более 10%.

Наиболее перспективны методы контроля чистоты поверхности и технологических сред, использующие различие физико-химических свойств чистой и загрязненной поверхностей. Одним из таких методов является трибометрический метод. Принцип действия прибора основан на измерении величины ионного загрязнения, которая выражается через эквивалентное количество хлорида натрия. Ионное загрязнение измеряют при погружении образца в проверочный раствор, состоящий из 2-пропанола (50% или 75%) и деионизированной воды. Растворение ионосодержащих веществ приводит к изменению проводимости смеси; из-

меренное значение этого изменения преобразуют в значение степени загрязнения, выраженное в $\text{мкг}/\text{см}^2$, в эквиваленте NaCl.

Для создания эталонной жидкости раствор аналитически чистого пропанола-2 подвергается очистке прокачкой через колонку со специальными смолами до получения минимального значения электрической проводимости. Испытываемые сборки помещают в специальный бак и под действием нагнетаемой жидкости удаляют остатки загрязнений и измеряют величину ионного загрязнения.

В приборах серии CM компании GEN3 (Великобритания) используются измерительные ячейки из чистого золота, баллистические усилители и мощные прокачивающие системы, обеспечивающие высочайшую точность измерений до $<0,005 \text{ мг}/\text{см}^2$ [18].

Прибор CM60 (рис. 5.21), включающий уникальную измерительную ячейку (VMC), автоматически рассчитывает площадь проверяемой поверхности по объему раствора, вытесненного при помещении объекта в бак. Он обеспечивает очень высокий уровень точности измерений и предлагает больше результатов количественного анализа, чем при использовании других методов. Графическое отображение результатов проверки включает автоматическое определение контуров кривых в пересчете на $\text{мкг}/\text{см}^2$ в эквиваленте NaCl. Загрязнение изображается в зависимости от времени, а кривая автоматически экстраполируется, что позволяет получать данные за короткое время проверки.

Приборы CM11 и CM12 представляют это настольные модели, которые применяют для контроля электронных модулей и печатных плат небольших размеров. Как и в CM60, ионное загрязнение измеряется при погружении образца в проверочный раствор, далее растворение ионосодержащих веществ приводит к изменению его проводимости. Согласно международным стандартам IPC-J-STD 001D и IPC-TM-650 допустимые уровни загрязнений в зависимости от класса аппаратуры приведены в табл. 5.5.



а



б

Рис. 5.21. Приборы контроля ионных загрязнений: СМ60 (а) и СМ11 (б)**Таблица 5.5.** Допустимые уровни загрязнений

Класс аппаратуры	Допустимый уровень ионных загрязнений, мкг/см ²	Допустимое содержание остатков канифоли, мкг/см ²
Бытовая электроника	до 1,56	до 200
Промышленная электроника	до 1,3	до 100
Специальная электроника	менее 1,0	до 40

Список литературы к главе 5

1. Максимихин, Б.А. Технологические процессы пайки электромонтажных соединений. – Л.: Энергия, 1980. – 80с.
2. Роговский В. Ф. Бесфлюсовое лужение выводов микросхем с помощью ультразвука // Техника средств связи. Сер. 7 ТПО, 1977.– Вып. 2 (3).– С. 115 – 116.
3. Ланин В. Л., Макаревич А. И. Ультразвуковое лужение деталей и элементов РЭА // Обмен опытом в радиопромышленности. – 1981. – Вып. 12. – С.10–12.
4. Manko, H.H. Solders and Soldering, Materials, Design, Production and Analysis for Reliable Bonding / H.H. Manko. – N.Y.: McGraw Hill, 2001. – 719 p.
5. Ланин В.Л., Сегачев И.И., Хотькин В.Т. Формирование матричной структуры шариковых выводов из припоя // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 1. – С.65– 69.
6. Inaba M., Yamakawa K., Iwase N. Solder Bump Formation Using Electroless Plating and Ultrasonic Soldering // IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manuf. Technology, 1990. – V. 13. – № 1. – P. 119–122.
7. Eddy Current Induced Heating for the Soldering Reflow of Area Array Packages / M. Li, H. Xu, S-W. R. Lee, J. Kim, D. Kim // IEEE Trans. on Advanced Packaging, 2008. – № 2(31). – P. 399–403.
8. Local Melt Process of Solder Bumping by Induction Heating Reflow / H. Xu and etc. // Soldering @ Surface Mount Technology. 2009. – № 4. – P. 45–54.
9. Смертина Т. Технология нанесения и обработки жидких защитных паяльных масок // Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 6. – С.41–47.
10. Ланин В.Л., Томаль В.С. Технология и оборудование ультразвуковой очистки изделий электроники // Технологии в электронной промышленности, 2007.– № 7. – С. 64–68.
11. Richards B.P., Burton P., Fother P.K. Damage-Free Ultrasonically-Assisted Cleaning of Printed Circuit Assemblies // GEC Journal of Research, 1993. – V. 10.–N. 3. – P. 140–153.
12. Leighton T. G. Acoustic Bubble.– London: Academic press, 1995. – P. 613.

13. Ланин В.Л., Томаль В.С. Оптимизация кавитационных полей в ультразвуковых ваннах очистки // Доклады НАН Беларуси, 2007. – Т.51. – № 3.– С. 112–114.
14. Ланин В.Л., Дежкунов Н.В., Томаль В.С. Приборное обеспечение измерения параметров ультразвуковых воздействий в технологических процессах // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2008.– № 2.– С. 51–55.
15. Сизов А. Технология отмывки, достойная внимания // Технологии в электронной промышленности.– 2012. – № 4. –С. 44–45.
16. Установки струйной отмывки SYSTRONIC – автоматизация процесса отмывки печатных узлов // <http://www.sovtest.ru>
17. Автоматизация и механизация сборки и монтажа узлов на печатных платах / А.В. Егунов [и др.]; под ред. В.Г. Журавского. – М.: Радио и связь, 1988.– 280 с.
18. Вахрушев О. Проверка степени ионного загрязнения—это техническая надежность электронных устройств // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – № 2. – С. 68–70.

ГЛАВА 6

МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАГРЕВА

6.1. Классификация методов нагрева и их сравнительная эффективность

Современные способы пайки классифицируют по источникам тепловой энергии, являющимися главным фактором при формировании соединений. Образование паяного соединения включает стадии активации паяемых материалов, перехода припоя в жидкое состояние, смачивания и растекания припоя, взаимодействия припоя с паяемыми материалами. Таким образом, на всех стадиях тепловая энергия системы определяет скорость протекания процессов и качество соединений.

Передача тепловой энергии осуществляется теплопроводностью, конвекцией, излучением либо их совместным действием. При нагреве теплопроводностью источниками тепловой энергии могут быть расплав в ванне, волна припоя, нагретая жидкость либо инструмент. Конвективный теплообмен осуществляется с использованием летучего теплоносителя: горячего газа, паров жидкости, пламени горелки. Излучение в форме концентрированных потоков энергии вводится в зону пайки контактным способом, например, УЗ колебаниями, либо бесконтактным: электромагнитной волной, инфракрасным излучением, лазерным лучом и т. д. Классификация процессов нагрева приведена на рис. 6.1. Основными критериями, характеризующими эффективность способов, могут служить [1]:

$$- \text{ скорость нагрева: } V_T = \Delta T / \Delta t \quad (6.1)$$

– локальность нагрева:
$$K_S = S_n / S_H \quad (6.2)$$

где S_H, S_n - площади нагретой зоны и паяного соединения соответственно;

– уровень энергопотребления:
$$K_w = W_n / W_u \quad (6.3)$$

где W_n, W_u - мощности, вводимая в зону нагрева и потребляемая от источника;

– уровень автоматизации:
$$K_A = \Sigma t_a / t_{II} \quad (6.4)$$

где t_a, t_n - длительности автоматизированных операций и технологического процесса в целом;

– уровень дефектности изделия:
$$K_\theta = N_\theta / N_{общ} \quad (6.5)$$

где N_θ – число дефектных соединений, $N_{общ}$ - общее число сформированных соединений в изделии.

Скорость нагрева определяет производительность и экономичность процесса пайки. УЗ активации позволяет реализовать бесфлюсовую пайку, а ВЧ, ИК и лазерное излучение – бесконтактные методы активации. Увеличение локальности нагрева позволяет ограничить температурное воздействие на паяемое изделие, снизить тем самым нагрев термочувствительных компонентов и платы, повысить качество паяных соединений.

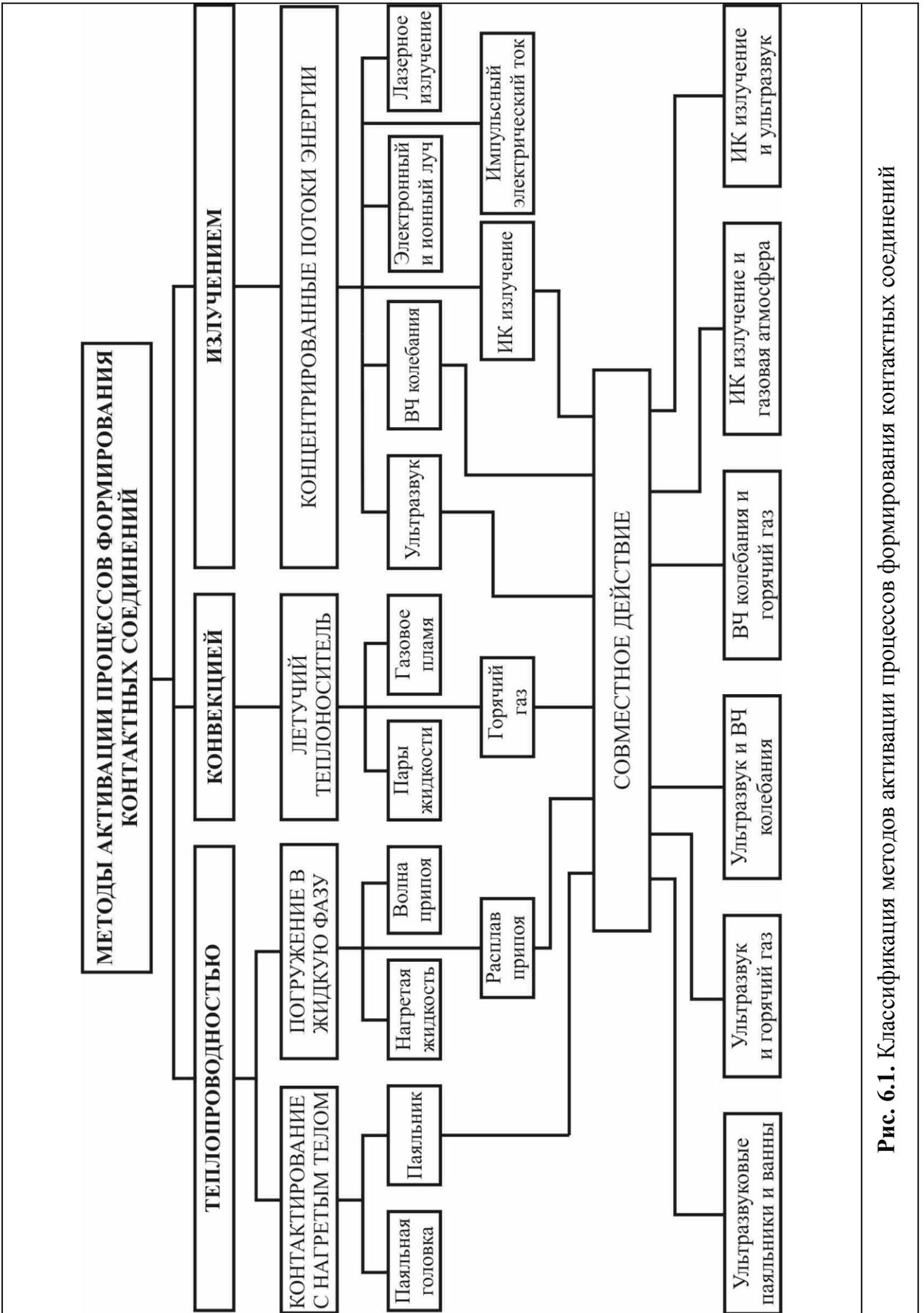


Рис. 6.1. Классификация методов активации процессов формирования контактных соединений

Уровень энергопотребления характеризует экономичность метода, способность эффективно использовать тепловую энергию без больших её потерь в окружающем пространстве. Уровень автоматизации показывает, какая доля операций всего технологического процесса автоматизирована и характеризует применяемое технологическое оборудование. Уровень дефектности показывает экономическую эффективность данного технологического процесса и использования оборудования в серийном производстве. Кроме перечисленных факторов выбор способа пайки определяется экологической чистотой процесса, требованиями техники безопасности, конструктивными формами паяных соединений. Современные процессы групповой пайки в электронике и приборостроении активируют концентрированными потоками энергии: ультразвуковой, высокочастотной, инфракрасной, лазерной и др., обеспечивающими локальное и в основном бесконтактное воздействие на паяемые детали, ускорение процессов физико-химического взаимодействия, что создает новые возможности соединения разнородных по химическому составу и свойствам материалов (табл. 6.1).

Активация пайки энергией УЗ колебаний интенсивностью (0,1–0,2) МВт/м² позволяет соединять такие труднопаяемые материалы, как керамику, стекло, ферриты, полупроводники и экономить при этом драгоценные металлы: серебро, золото, палладий, платину. УЗ лужение выводов электронных компонентов, ИС, коммутационных элементов восстанавливает их паяемость, утраченную после длительного хранения, позволяет автоматизировать технологический процесс и отказаться от применения активированных флюсов и их очистки. Однако для УЗ активации требуются специальные припои, защитные среды, тщательный контроль параметров. Воздействие энергии электромагнитных колебаний частотой 200–2000 кГц интенсивностью до 10⁷ Вт/м² на процессы формирования паяных соединений увеличивает до 10 раз скорость нагрева вихревыми токами, локализует до 5–10 мм² область пайки, увеличивает растекание припоя за счет пондеромоторных сил.

Оснащение оборудования транспортными устройствами, микропроцессорными системами управления обеспечивает автоматизацию процесса и переход к безлюдной технологии. Недостатками являются проблема защиты персонала от мощного электромагнитного излучения, зависимость скорости нагрева от электрофизических свойств металлических деталей. Коротковолновое инфракрасное (ИК) излучение с длинами волн 1,0–2,5 мкм и интенсивностью до 10⁸ Вт/м² позволяет быстро нагревать разнородные по химическому составу материалы, повысить локальность нагрева за счет фокусировки излучения, что обеспечивает групповую пайку элементов, ИМС с планарными выводами при дозированном нанесении припоя или пасты на места будущих соединений.

Лазерное излучение в оптическом диапазоне волн 0,7–10,6 мкм обеспечивает наибольшую концентрацию энергии (до 10¹² Вт/м²), высокую локальность и практическую безинерционность лазерного луча, что способствует его высокой

управляемости с помощью микропроцессорных средств. Применение лазерного луча для групповой пайки требует решения технической задачи его разложения на несколько составляющих.

Таблица 6.1. Сравнительная характеристика способов нагрева при пайке

Способы пайки	Скорость нагрева в от-носительных числах	Удельная мощность 10^4 Вт/м^2	Время нагрева			Локаль-ность нагрева		Припой		Тип производст-ва		
			большое	среднее	короткое	всей детали	зоны пайки	легкоплавкий	среднеплавкий	малые серии	серийный	массовый
В печи	1	0,5	×			×		×	×	×	×	×
Паяльником	25	10		×		×		×	×	×	×	×
В соляной ван-не	50	20	×	×		×			×	×	×	
ИК излучением	100	40		×				×		×	×	
Газоплаз-менная	200	80		×				×	×	×	×	×
Волной припоя	400	100		×				×			×	×
Электросопротивлением	800	200			×		×	×	×		×	×
Индукционная	1000	10^3			×		×	×	×	×	×	×
Лазерная	10000	10^5			×		×	×	×		×	×

Термические аспекты процесса пайки электронных модулей включают два основных требования:

- 1) паяемые выводы компонентов и контактные площадки платы должны быть нагреты до температуры, достаточной для смачивания их припоем;
- 2) температура нагрева компонентов и подложек в процессе пайки не должна быть слишком высокой, чтобы влиять на их рабочие характеристики.

Каждый тип электронного компонента имеет свои параметры процесса пайки: температуру нагрева и время. Поскольку в большинстве электронных модулей электронные компоненты имеют различные тепловые характеристики, то, для того, чтобы соединить их в одной операции пайки, необходима оптимизация температурно-временного профиля процесса.

Уравнение нагрева для процесса пайки имеет вид [2]:

$$T_{II} - T_0 = (T_{II} - T_0)(1 - \exp \frac{-t}{\tau}), \quad (6.6)$$

где T_{II} – температура пайки, T_0 – начальная температура, T_{II} – температура источника нагрева, t – время нагрева, τ – время отклика процесса нагрева.

Время отклика процесса нагрева определяется как :

$$\tau = \frac{\rho c V}{\alpha S}, \quad (6.7)$$

где ρ – плотность материала, c – удельная теплоемкость, V – объем зоны нагрева, α – коэффициент теплопередачи, S – площадь, через которую осуществляется передача тепла.

В зависимости от температуры источника различают две стратегии нагрева в процессах пайки: интенсивная и умеренная. В первом случае температура источника значительно превышает требуемую температуру пайки, нагрев паяемых компонентов происходит с высокой скоростью и необходим очень точный контроль времени нагрева во избежание повреждения электронных компонентов. Во втором случае температура источника нагрева близка или немного превышает температуру пайки, нагрев асимптотически достигает требуемой температуры пайки, время пайки не критично и находится в определенном диапазоне значений. Классификация процессов пайки электронных модулей в зависимости от стратегии нагрева приведена в табл. 6.2.

Таблица 6.2. Классификация процессов пайки электронных модулей

Умеренный нагрев $t < 0,5\tau$	Среднеинтенсивный нагрев $0,5\tau < t < 3\tau$	Экстремально интенсивный нагрев $t > 3\tau$
Парофазная пайка	Пайка резистивным нагревом	Пайка инфракрасным нагревом
Пайка в печи	Пайка паяльником	Пайка высокочастотным нагревом
Пайка нагретой жидкостью	Пайка погружением в припой	Пайка ионным и электронным лучом
Пайка горячим газом	Пайка волной припоя	Лазерная пайка

В зависимости от выбранной стратегии нагрева процесс пайки характеризуется различными температурно-временными диаграммами, которые позволяют инженерно-техническому персоналу правильно программировать работу паяльного оборудования, обеспечивая при этом высокое качество паяных соединений и минимально возможную тепловую нагрузку электронных компонентов. Температурно-временная диаграмма, как правило, содержит три стадии: нагрев, выдержка при температуре пайки и охлаждение. На первой стадии скорость нагрева

выбирают исходя из сопротивления электронных компонентов тепловому удару, а также с учетом температуры и времени активации флюса. На второй стадии время выдержки зависит от условий растекания припоя, заполнения припоем зазоров в соединениях и не превышает несколько секунд. Скорость охлаждения паяных соединений выбирается из условия устранения образования трещин при отвердевании припоя.

6.2. Оборудование и инструмент для нагрева теплопроводностью

Нагрев теплопроводностью жала паяльника широко применяется при монтаже изделий в условиях мелкосерийного производства, а также во всех случаях ремонтных работ. Технологический процесс пайки паяльником состоит из следующих операций: фиксации соединяемых элементов, нанесения дозированного количества флюса и припоя, нагрева места пайки до заданной температуры и выдержка в течение фиксированного времени, охлаждения соединения без перемещения паяемых деталей, очистки соединения, контроля качества. Для обеспечения надежности паяных соединений предусматривают:

- механическое закрепление элементов и монтажных проводников на контактных лепестках и гнездах при объемном монтаже,
- выбор оптимальных зазоров в конструкции соединений между поверхностями монтажных элементов.

При пайке оловянно-свинцовыми припоями зазоры d определяют из соотношения:

$$d = D_{омс} - Dв \geq 0,2 - 0,3 \text{ мм}, \quad (6.8)$$

где $D_{омс}$ – диаметр металлизированного отверстия, $Dв$ – диаметр вывода элемента.

Температура пайки выбирается из условия наилучшей смачиваемости припоем и отсутствия значительного теплового воздействия на паяемые элементы. Выбор температуры пайки осуществляют практически на 20-50°С выше температуры плавления припоя (рис. 6.2). Как видно из графической зависимости степени смачивания от температуры нагрева припоя на участке А смачивание недостаточно, С - максимальное, В - оптимальное (не вызывает перегрева припоя и паяемых материалов).

Требуемый температурный режим при индивидуальной пайке обеспечивается теплофизическими характеристиками применяемого паяльника:

- температурой рабочего конца жала,
- степенью стабильности этой температуры, обусловленной динамикой теплового баланса между теплопоглощением паяемых деталей, теплопроводностью нагревателя и теплосодержанием паяльного жала,
- мощностью нагревателя и термическим КПД паяльника, определяющими интенсивность теплового потока в паяемые детали.

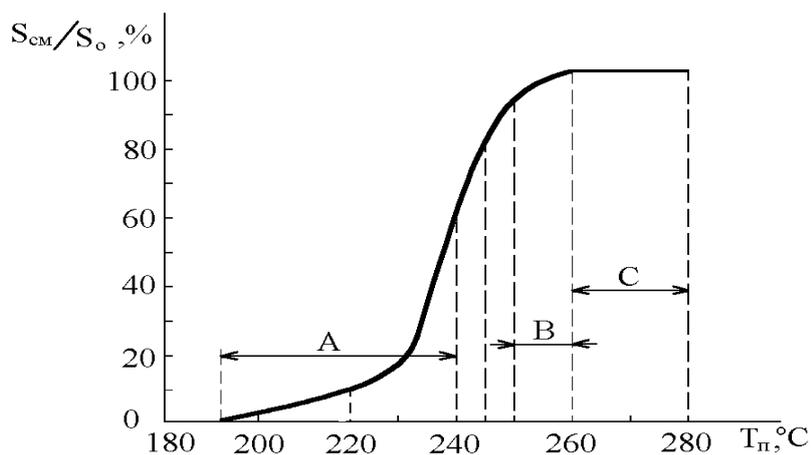


Рис. 6.2. Зависимость степени смачивания припоем от температуры пайки

В технологии изделий электроники поддержание на заданном уровне температуры жала паяльника является весьма важной задачей, поскольку при формировании электроmontажных соединений на печатных платах с использованием микросхем, полупроводниковых приборов и функциональных элементов, термочувствительных и критичных к нагреву, возможен выход из строя дорогих и дефицитных элементов, снижение надежности изделия. Особенно критична к температурному режиму ручная пайка паяльником. Режим пайки паяльником задается следующими параметрами: температура жала паяльника $280-320^\circ\text{C}$, время пайки не более 3–5 с. Однако из-за интенсивной теплоотдачи сначала в припой, набираемый на жало, а затем в паяемые элементы температура рабочей части жала паяльника снижается на $30-110^\circ\text{C}$ и может выйти из оптимального температурного интервала пайки (рис. 6.3).

Соотношение между временем пайки и продолжительностью пауз должно обеспечить восстановление рабочей температуры паяльного жала. Длительность восстановления зависит от теплопроводности жала, его длины, эффективной мощности нагревателя и степени охлаждения при пайке. Рекомендуемые мощности паяльников: для микроэлектронных изделий 4, 6, 12, 18 Вт; для печатного монтажа 25, 30, 35, 40, 50, 60 Вт; для объемного монтажа 50, 60, 75, 90, 100, 120 Вт. КПД паяльников имеет в настоящее время тенденцию к повышению от 35 до 55% за счет внутреннего обогрева жала вместо внешнего. Напряжение питания нагревателя - 24, 36, 42 В, а в бытовых паяльниках оно может составлять 220 В.

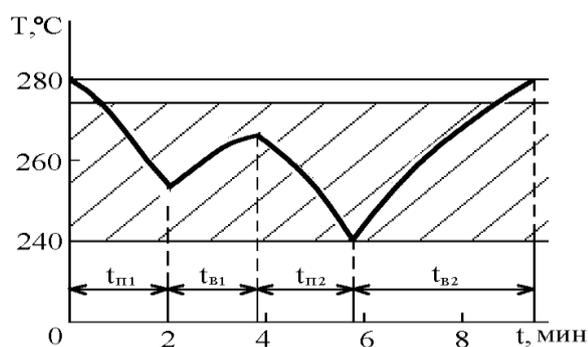


Рис. 6.3. Термический цикл пайки паяльником для припоя ПОС 61

Соотношение между временем пайки и продолжительностью пауз должно обеспечить восстановление рабочей температуры паяльного жала. Длительность восстановления зависит от теплопроводности жала, его длины, эффективной мощности нагревателя и степени охлаждения при пайке. Рекомендуемые мощности паяльников: для микроэлектронных изделий 4, 6, 12, 18 Вт; для печатного монтажа 25, 30, 35, 40, 50, 60 Вт; для объемного монтажа 50, 60, 75, 90, 100, 120 Вт. КПД паяльников имеет в настоящее время тенденцию к повышению от 35 до 55% за счет внутреннего обогрева жала вместо внешнего. Напряжение питания нагревателя - 24, 36, 42 В, а в бытовых паяльниках – 220 В.

В паяльнике перенос тепла осуществляется за счет теплопроводности жала, которое служит аккумулятором тепла, выделяемого нагревателем, расположенном на стержне. Взаимосвязь температуры жала длиной L в рабочей зоне $T_{ж}$ и зоне нагрева T_n (рис. 6.4) выражена отношением:

$$T_{ж} = \frac{T_n}{ch(\beta \cdot L)}. \quad (6.9)$$

Обобщенный параметр β равен:

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \Pi}{\lambda \cdot S}} = \sqrt{\frac{4\alpha}{\lambda \cdot D}}, \quad (6.10)$$

где α – коэффициент теплоотдачи поверхности, Π – периметр жала, λ – коэффициент теплопроводности, S – площадь поперечного сечения, D – диаметр.

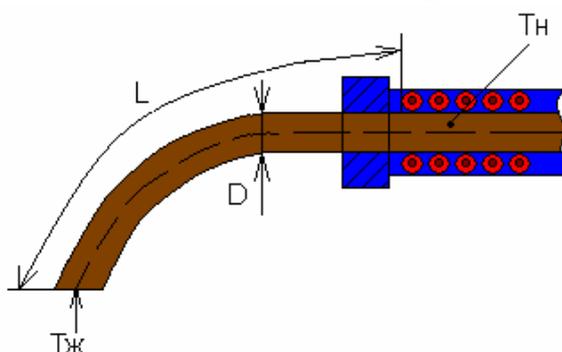


Рис. 6.4. Схема к расчету температуры жала паяльника

Расчеты по формуле (6.10) для медного стержня паяльника диаметром 6 мм дают значение $\beta=3,12$, тогда $T_{жс} = T_n / 1,2$. В установившемся режиме количество теплоты, накопленное в медном стержне, зависит от мощности нагревателя и изменение температуры может быть определено:

$$\Delta T = I^2 R t / c \cdot m, \quad (6.11)$$

где c – удельная теплоемкость меди, m – масса стержня.

Расчетные зависимости по формуле (6.11) (рис. 6.5) согласуются с экспериментальными данными в режиме теплового баланса. Для более точных расчетов необходимо учитывать потери тепла на теплоотдачу к защитному кожуху и на излучение от поверхности стержня.

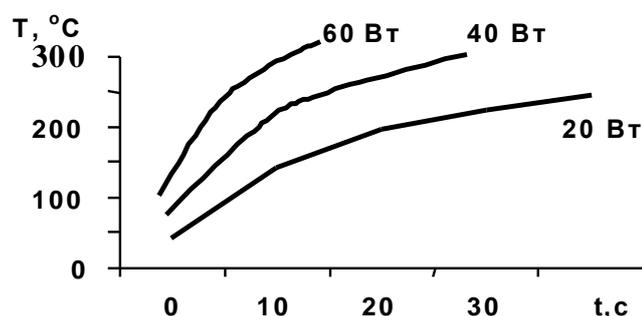


Рис. 6.5. Температурно–временные зависимости для жала паяльника

Способ пайки параллельными электродами основан на прямом нагреве места соединения током, подводимым через электроды (рис. 6.6). Достаточное для расплавления припоя тепло выделяется в паяемых деталях (выводе ИС и контактной площадке печатной платы) на участке межэлектродного зазора, в который вводится припой. Электроды перемещаются в вертикальной плоскости независимо друг от друга и прижимаются к выводу ИС усилием F . От регулируемого источника питания через понижающий трансформатор подается импульс тока, который перетекает от одного электрода к другому через паяемые детали [3].

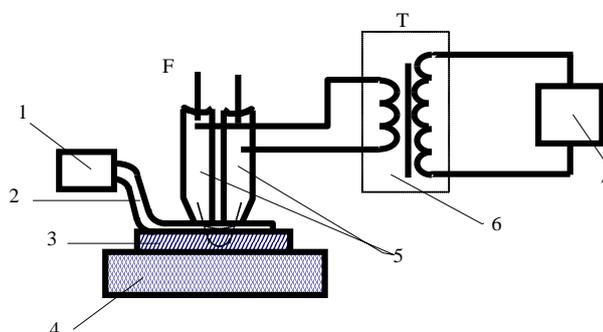


Рис. 6.6. Схема пайки параллельными электродами: 1 – ИС, 2 – вывод, 3 – контактная площадка, 4 – плата, 5 – электрод, 6 – трансформатор, 7 – источник питания

Ввиду большого разброса параметров соединяемых материалов (толщины выводов ИС и покрытий контактных площадок) в процессе пайки сильно меняется сопротивление нагрузки, а с увеличением нагрева деталей растет электро-сопротивление в зоне контакта. Поэтому для нагрева при пайке параллельными электродами используют регулируемый источник с целями обратной связи, обеспечивающий стабилизацию напряжения на электродах:

$$U_{\text{э}} = I_n \cdot R = \text{const} . \quad (6.12)$$

Для способа пайки параллельными электродами разработаны источники тока повышенной частоты (до 1 кГц), которые обеспечивают подачу импульсного тока пачками импульсов, стабилизированных по напряжению, длительностью 5–50 мс. Это позволяет стабилизировать температуру в зоне нагрева, а также за счет возникновения вибраций в расплавленном припое под действием электродинамических сил дополнительно активировать процесс смачивания выводов ИС припоем. Важным преимуществом является возможность активного контроля качества соединений по величине паяльного тока, что делает этот способ более экономичным и производительным по сравнению со способами, использующими визуальный контроль.

Способ пайки параллельными электродами реализован в автомате с программным управлением «ПОИСК» для ИС в корпусе 401.14–1. Автомат состоит из координатного стола, 2-х паяльных головок с автоматической раздвижкой, манипулятора, системы управления на основе микроЭВМ «Электроника С5–21М». Производительность автомата - до 200 шт/ч, скорость перемещения координатного стола по осях X и Y на 300 мм - 0,625 м/мин, шаг - 0,625; 1,25 мм. Давление электродов на выводы 0,5–18 Н, напряжение на электродах 0,3–1,0 В; время пайки - 0,10–0,8 с.

6.3. Конвективные источники нагрева

При нагреве конвекцией в качестве теплоносителя используют воздух, водород, азот, аргон или смесь газов. В большинстве случаев стремятся исключить из состава теплоносителя кислород, окисляющий припой в процессе пайки. Для нагрева газа чаще всего используются электронагревательные элементы, устанавливаемые вокруг трубопроводов или в специальных камерах, по которым пропускают теплоноситель. Хорошо зарекомендовал себя способ нагрева газа пропусканием электрического тока от низковольтного источника по полой трубе, выполненной из материала с большим омическим сопротивлением (рис. 6.7).

От магистрали повышенного давления газ или горячий воздух проходит через устройства нагрева и затем поступает к соплам рабочих головок. В этой зоне находится печатная плата с предварительно смонтированными элементами и нанесенным в места соединений необходимым количеством припоя и флюса.

Технологический режим пайки обеспечивается за счет изменения величины расхода и температуры направленного потока газа и регулирования скорости относительного перемещения платы и головок. Для предотвращения перегрева навесного элемента или контактного вывода его обдувают узким направленным потоком холодного воздуха.

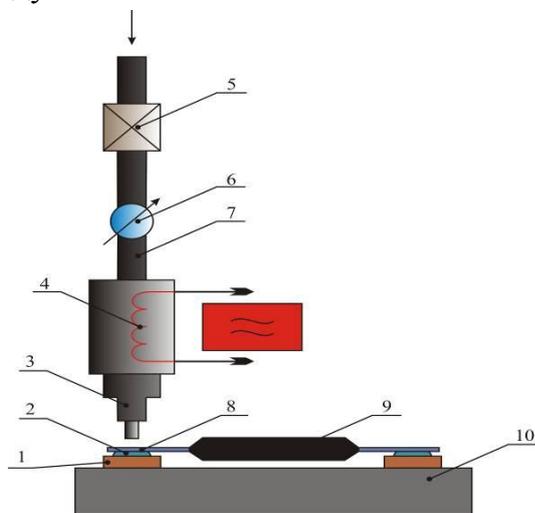


Рис. 6.7. Схема пайки горячим газом: 1 – контактная площадка, 2 – припой, 3 – сопло, 4 – нагреватель, 5 – редуктор, 6 – манометр, 7 – магистраль, 8 – вывод элемента, 9 – элемент, 10 – плата

С целью снижения нагрева платы струя теплоносителя направляется обычно под некоторым углом к ее поверхности, чтобы зона нагрева была шире и осуществлялся предварительный подогрев соседних компонентов. Если в качестве теплоносителя используется горячий воздух, припой должен быть покрыт слоем флюса для защиты его от окисления.

Дальнейшим развитием метода является применение двух струй газа, направленных навстречу друг другу, когда в результирующую горячую область помещается паяемый компонент. Для подачи газа используют компрессор, а разогрев его происходит в электронагревателе мощностью 0,8–1,0 кВт. Поскольку воздух является плохим носителем тепла, то чаще используют аргон, азот или их смеси. На рис.6.8 представлена схема установки пайки компонентов газовым нагревателем, где в качестве теплоносителя используется инертный газ.

Установка позволяет производить монтаж и демонтаж компонентов без окисления поверхности их выводов и контактных площадок, также за счёт использования в качестве теплоносителя инертного газа передать в рабочую зону большее количество тепла, что способствует более эффективному нагреву, а следовательно, меньшему времени воздействия температуры на компоненты и печатную плату. Оборудование для газовой пайки выполняет 80–100 соединений в минуту на одно сопло.

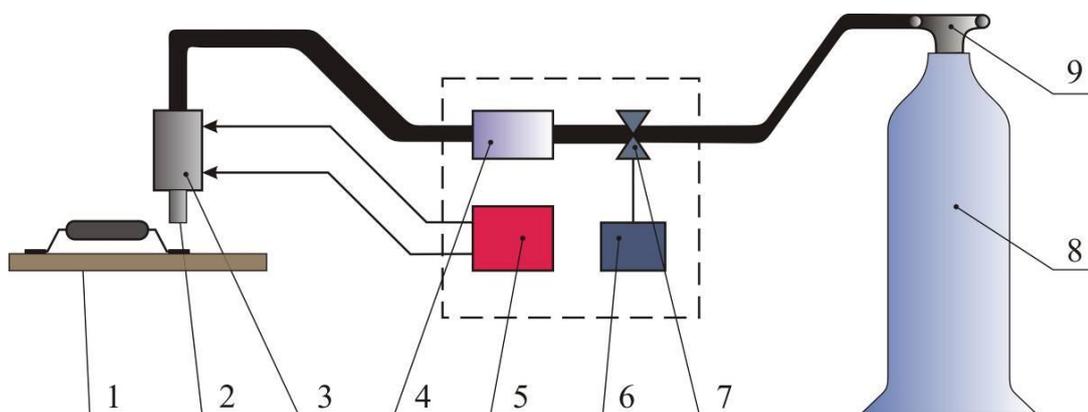


Рис. 6.8. Установка пайки газовым нагревателем: 1 – печатная плата с компонентами, 2 – насадка, 3 – нагреватель, 4 – датчик контроля потока газа, 5 – источник питания нагревательного элемента, 6 – система управления клапаном, 7 – клапан регулировки потока газа, 8 – баллон с газом, 9 – редуктор

Настольная установка SURFACE MOUNT 201 фирмы FUNK & MEIER AG для пайки чиповых элементов горячим газом снабжена стереомикроскопом для работы оператора по сборке плат размером 250x450 мм и высотой элементов до 25 мм, а также блоком микропроцессорного управления или персональной ЭВМ (рис. 6.9). Воздух под давлением 4–8 бар и регулируемой температурой в пределах 150–450°С подается в зону пайки.

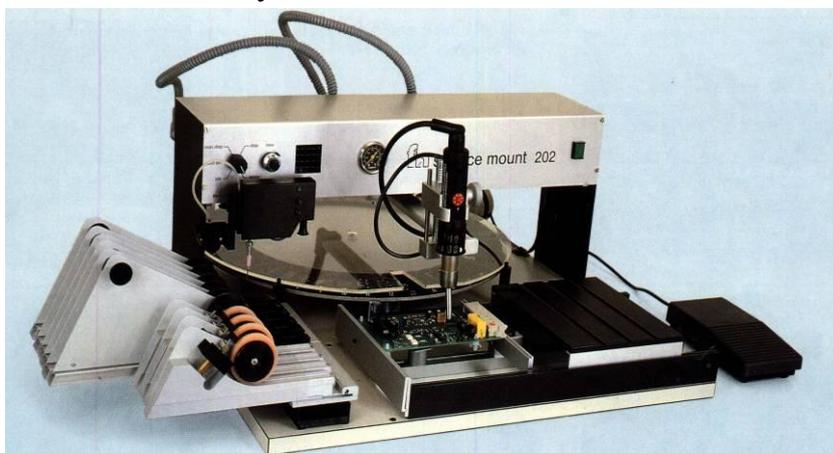


Рис. 6.9. Установка пайки SMD горячим газом

Процесс передачи тепла горячим газом описывается выражением:

$$Q = \frac{\lambda St \Delta T}{l}, \quad (6.13)$$

где: λ – теплопроводность воздуха; S – площадь зоны нагрева; t – время нагрева; ΔT – разность температур между источником тепла и окружающей средой; l – расстояние от источника тепла до поверхности.

При расчёте количества тепла, выделяемого в рабочей зоне, необходимо учитывать конструктивный фактор, влияющий на рассеивание воздуха (рис.

6.10) при выходе из сопла насадки термофена (угол рассеивания α , который зависит от конструкции сопла):

$$K_r = \frac{r}{l \cdot \tan(\alpha) + r}, \quad (6.14)$$

где: r – радиус сопла насадки; a – расстояние, на которое рассеивается воздух при выходе из сопла.

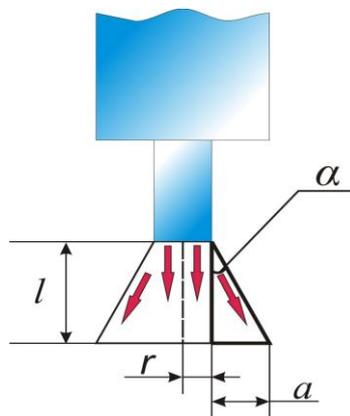


Рис. 6.10. Распространение воздушного потока из сопла

Тогда количество выделяемого тепла в рабочей зоне рассчитывается как:

$$Q = K_r \cdot \frac{\lambda St \Delta T}{l}. \quad (6.15)$$

Температуры нагрева в рабочей зоне зависит от времени, условий теплообмена и теплоемкости материала платы:

$$T_H = T_T \left(1 - e^{-t/\tau_H} \right), \quad (6.16)$$

где: T_T – температура теплоносителя; τ_i – постоянная времени нагрева:

$$\tau_H = \frac{C_T}{\alpha \cdot S}, \quad (6.17)$$

где: C_T – теплоёмкость материала печатной платы; α – коэффициент теплообмена источника тепла с поверхностью печатной платы:

$$\alpha = \frac{P}{S \cdot \Delta T}, \quad (6.18)$$

где: P – мощность конвективного источника нагрева:

$$P = K_r \frac{\partial Q}{\partial t} = K_r \frac{\lambda S \Delta T}{l}. \quad (6.19)$$

Температура при пайке и демонтаже конвективным источником нагрева пропорциональна температуре нагретого воздуха, скорости его движения и зависит от расстояния до поверхности нагреваемой зоны. Оптимальное расстояние

от зоны нагрева до насадки термофена не должно превышать 4–6 мм [4] (рис. 6.11).

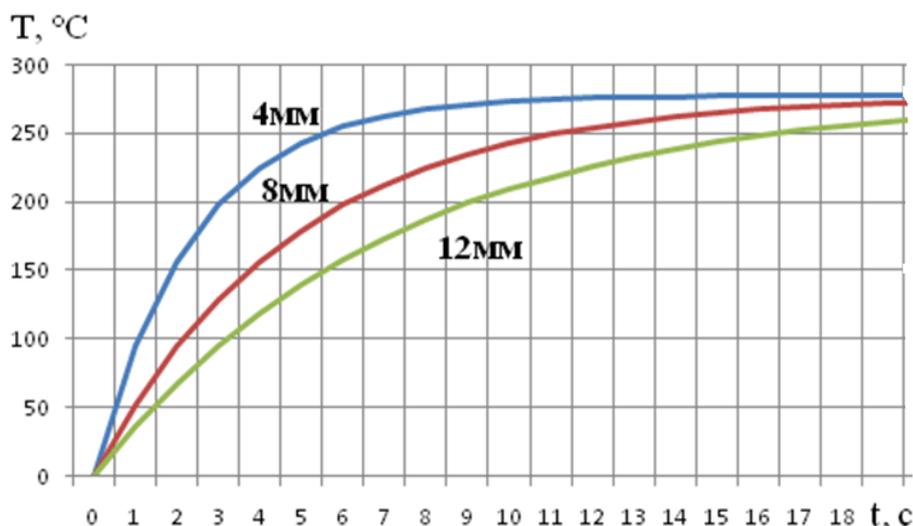


Рис. 6.11. Температурные профили в зоне нагрева при различных расстояниях до поверхности

6.4. Конденсационная пайка

Технологию пайки в паровой фазе (конденсационную пайку) предложила в 1973 г. фирма Du Pont (США), после того как были запатентованы специальные рабочие жидкости. Преимуществами данного метода является равномерный нагрев электронной сборки до постоянной во времени температуры пайки в анаэробной инертной среде с применением слабоактивированных флюсов, что позволяет получить однородные паяные соединения и исключить образование перемычек припоя на плате.

Необходимые для пайки припой и флюс наносят на плату в форме припойной пасты перед ее погружением в пар. По мере погружения платы в зону насыщенного пара над кипящей рабочей жидкостью пар конденсируется на всей ее поверхности, быстро и равномерно нагревая его до температуры пайки. Припойная паста расплавляется и образует галтель между выводом компонента и контактной площадкой платы. Когда температура платы достигнет рабочей температуры жидкости, конденсация прекращается, тем самым заканчивается и нагрев платы.

Повышение температуры платы до температуры расплавления припоя осуществляется в короткий промежуток времени (до 10 с) и не поддается регулированию. Для уменьшения термических напряжений в компонентах вводят предварительный подогрев платы.

Значительное влияние на качество пайки оказывает температурно-временной профиль процесса. Методы оплавления припоя (в парогазовой фазе, ИК нагрев и обдувом нагретым воздухом) обеспечивают различные температурно-временные диаграммы нагрева. Поэтому температурно-временной профиль процесса пайки

(рис. 6.12) должен быть определен исходя из конструктивных особенностей SMD, применяемых материалов и др. до выбора метода и оборудования.

Как видно из приведенной зависимости процесс оплавления припоя можно разделить на три стадии: предварительный нагрев, оплавление, охлаждение. Предварительный нагрев до 120–130°C платы и компонентов вызывает испарение растворителя из припойной пасты, удаление окисных пленок за счет действия флюса и расплавление частиц припойной пасты. Стадия оплавления припоя протекает при температуре, на 25–40°C в течение 20–60 с превышающей температуру плавления применяемого сплава, что снижает силы поверхностного натяжения припоя, увеличивает смачиваемость соединяемых поверхностей. Длительность и температурный профиль охлаждения со скоростью 1–2°C/с также оказывает влияние на свойства паяного соединения, в том числе на формирование мелкозернистой структуры сплава и уровень остаточных напряжений.

При выборе температурно-временного профиля необходимо учитывать допустимые температуры нагрева электронных компонентов, которые могут подвергаться без разрушений воздействию температур 210–220°C в течение 20–60 с.

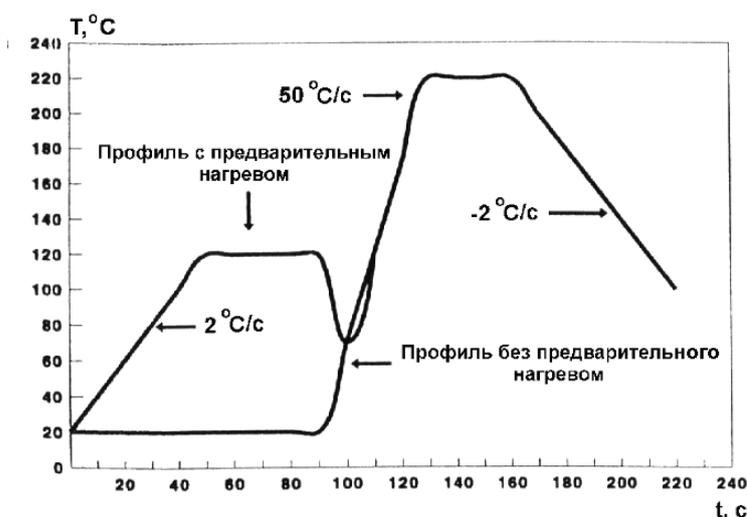


Рис. 6.12. Температурно-временной профиль пайки в парогазовой фазе

Критичны к высокоскоростным тепловым воздействиям конденсаторы, в которых тепловой удар может вызвать появление трещин и отслоению металлизации. Рекомендуемая скорость нагрева при пайке конденсаторов составляет не более 2°C/с. Высокоскоростной нагрев может вызвать разрушение корпусов ИС, в частности, из-за расширения и выделения, содержащейся в материале влаги. Для предотвращения этого явления применяется тщательная предварительная очистка и сушка корпусов.

Одной из важных особенностей этого процесса является независимость режимов нагрева от геометрической формы и размеров плат. Другие достоинства процесса:

- температура определяется и контролируется самим процессом и является наиболее низкой из применяемых методов оплавления;
- рабочая жидкость испаряется с поверхности печатной платы, не оставляя на ней следов;
- процесс пайки химически чистый, так как элементы взаимодействуют с дистиллированной рабочей жидкостью;
- рабочая жидкость и ее пары не вызывают повреждения электронных компонентов;
- рабочие жидкости имеют низкую растворяющую способность, что обеспечивает ее совместимость практически со всеми используемыми материалами;
- минимальное окисление паяных соединений.

Метод пайки в ПГФ является в настоящее время одним из основных в технологии ПМ. Он основан на конденсации насыщенного пара рабочей жидкости на поверхности сборочной единицы после ее входа в рабочую зону. При этом происходит одновременный нагрев всех элементов сборки до температуры, соответствующей переходу теплоносителя из газообразного в жидкое состояние и расплавление припоя, с образованием при последующем охлаждении паяного соединения между контактной площадкой и выводом компонента. Когда температура платы повышается до температуры жидкости, процесс конденсации прекращается, соответственно, заканчивается и нагрев припойной пасты. Повышение температуры платы от начальной до температуры плавления пасты происходит очень быстро и трудно поддается регулированию. Поэтому, для уменьшения термических напряжений в элементах конструкции в технологический процесс вводится предварительный подогрев. Максимальная температура нагрева припойной пасты также не регулируется и определяется температурой кипения рабочей жидкости. Насыщенный пар получают при кипении фторорганических жидкостей, которые имеют температуру кипения на несколько десятков градусов превышающую температуру плавления припоя.

Рабочие жидкости-теплоносители должны обладать следующими свойствами: химической инертностью; устойчивостью к окислению; температурной стабильностью; низкими вязкостью и поверхностным натяжением; хорошей смачиваемостью; высокими диэлектрическими характеристиками; негорючестью и легкой испаряемостью.

В наибольшей степени этим свойствам удовлетворяют фторорганические соединения, которые получают путем замещения атомов водорода органическими структурами. Требуемый для конденсационной пайки уникальный набор свойств в значительной степени определяется сильной химической связью между атомами углерода и фтора. Для конденсационной пайки используются следующие виды фторорганических соединений: перфторуглеродные, перфтортриамилинные, перфторфенантренные, фторополиэфирные. Температура их кипения находится в диапазоне от 174°C (FC-43) до 253°C (FC-71). Недостатками этих жидко-

стей являются относительно низкая молекулярная масса, и соответственно, низкая плотность пара, что обуславливает его большие расходы в процессе пайки. Некоторые жидкости этой серии имеют относительно низкую температурную стабильность, что приводит с их разложению при перегреве с выделением высокотоксичного газа перфторизобутилена и фтористоводородной кислоты. Более высокой стабильностью в этом отношении отличаются жидкости FC5311, FC5312.

Основной частью установки для пайки в паровой фазе камерного типа является резервуар 1 со слоем рабочей жидкости 2 на дне (рис. 6.13). Пар 3 образуется за счет нагрева до кипения с помощью либо внешних, либо встроенных нагревателей 4. Для предотвращения утечки пара в верхней части резервуара расположены змеевики 5. По мере прохождения смонтированной платы 6 над кипящей жидкостью пар конденсируется над всей ее поверхностью, быстро и равномерно прогревая до температуры пайки. В качестве жидких теплоносителей используются перфторированные инертные жидкости с температурой кипения несколько выше температуры плавления оловянно-свинцового припоя, например, наиболее распространенный теплоноситель Fluoronert Liquid C-70 имеет температуру кипения 215°C. С целью предотвращения утечки паров дорогого фторуглерода поверх основной технологической среды создается защитная среда из фреона. Недостатками процесса являются: длительность процесса пайки (40–50 с), высокая стоимость жидкого теплоносителя, потери рабочей жидкости в атмосферу, образование различных кислот на границе раздела жидкостей.

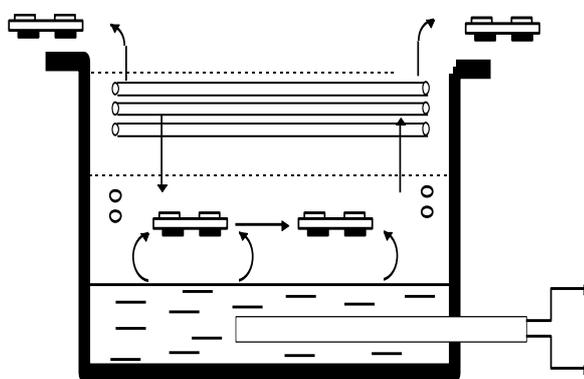


Рис. 6.13. Схема установки пайки в паровой фазе камерного типа

Для автоматизированной установки поверхностно монтируемых компонентов и их пайки используют линию «ТЕМП-4000», которая включает модуль трафаретной печати для нанесения лудящих паст, модуль установки компонентов и установку пайки. Номенклатура устанавливаемых компонентов: резисторы P1-11 (МЭЛФ), P1-12 (чип), конденсаторы K10–17, транзисторы в корпусах КТ-27, КТ-28, КТ-46, КТ-47, интегральные микросхемы в корпусах 2, 4, Н, Ф. Рабочие температуры жидкостей – теплоносителей: 180±5, 235±5°C. Производительность установки пайки составляет до 30 сборок/ч. Установка работает без использова-

ния защитной жидкости – хладона 113. Мощность, потребляемая установкой – 1,6 кВт.

В установках конвейерного типа IL-6 - IL-24 фирмы HTC Product (США) имеется транспортер для ввода изделия в камеру, дополнительные холодильники, вакуумные шлюзы, что исключает применение дополнительной защитной жидкости. Недостатком парофазной пайки является ее критичность к использованию канифольных флюсов, остатки которых нерастворимы в рабочей жидкости и, попадая на нагреватель, снижают его теплоотдачу. При повышении плотности мощности более 10 Вт/см^2 происходит локальный перегрев рабочей жидкости и ее разложение с выделением высокотоксичного газа перфторизобилена, что может привести к отравлению персонала.

Рекламируемый в 80–годах процесс пайки SMD в парогазовой фазе ввиду таких недостатков, как дефицитность инертных жидкостей, разогрев до температуры пайки всей платы и компонентов, низкая скорость нагрева, экологические проблемы разложения жидкости значительно сократил область применения. С целью устранения этих недостатков в 90–х годах был разработан метод впрыскивания, когда для получения пара определенное количество рабочей жидкости подавалось на электроплитку и сразу испарялось. Это позволяло сравнительно быстро достичь температуры пиковой зоны, однако приводило к перегреву пара и окислению паяемых поверхностей.

В конце 90-х годов на смену конденсационных печей с впрыскиванием пришли печи с варьруемым управлением температурным градиентом [5]. В отличие от впрыскивания в данном методе используется насыщенный пар, и тем самым объединяются основные преимущества технологии конденсационной пайки для осуществления надежного и воспроизводимого процесса пайки. Зона пайки находится над резервуаром с рабочей жидкостью, которая нагревается с помощью электроплиток и образует слой насыщенного пара непосредственно над резервуаром. Так как пар тяжелее воздуха, его утечка из вертикальной печи невозможна.

При погружении электронного модуля в паровую зону слой насыщенного пара обваливается. При этом пар конденсируется на всей поверхности электронного модуля, сразу образуя на нем замкнутый слой жидкости. Поверхностное натяжение слоя жидкости и его капиллярные силы оттесняют воздух от электронного модуля. Таким образом, создается защитная пленка, которая гарантирует отсутствие кислорода во время всего процесса пайки. После выхода электронного модуля из зоны пайки этот слой жидкости испаряется с поверхности без остатков. Поверхностный слой конденсата находится в прямом контакте со слоем насыщенного пара. При подаче количества энергии, соответствующей желаемому температурному коэффициенту, за счет контролируемого нагрева, возникает насыщенный пар в количестве, эквивалентном данной энергии. Это определенное количество пара конденсируется в виде замкнутого слоя жидкости и транспортирует в этот слой точно определенное количество энергии во время конден-

сации. За счет этого увеличивается энергоемкость слоя и соответственно увеличивается температура электронного модуля под слоем конденсата. При этом согласно законам физики распределение и перенос энергии по всему электронному модулю происходит равномерно. Таким образом, обеспечивается постоянный и равномерный перенос энергии и, следовательно, нагрев всего электронного модуля. Этот процесс продолжается до тех пор, пока электронный модуль не достигнет температуры пара. Как только устанавливается температурное равновесие, процесс конденсации автоматически прекращается.

Компанией Asscon, производящей оборудование для конденсационной пайки в течение 10 лет, разработаны конденсационные печи VP 2000 Inline, в которых реализовано программное управление температурным градиентом нагретой зоны (рис. 6.14). Это препятствует резкому переносу тепла при обваливании слоя пара, как это происходило в первых печах конденсационной пайки.

На поверхности изделия постоянно находится слой конденсата, гарантирующий отсутствие кислорода во время всего процесса пайки. После выхода электронного модуля из зоны пайки этот слой жидкости испаряется с поверхности без остатка. Температура пайки для бессвинцовых припоев 230°C.

Компания IBL Lottechnik GmbH (Германия) разработала линейку оборудования пайки в паровой фазе. Двухкамерные установки SV260 и SV360 Economy класса для мелкосерийного производства сохраняют до 20 термопрофилей, позволяют управлять мощностью нагревателей и, следовательно, градиентом температуры.



Рис. 6.14. Конденсационная печь для пайки VP 2000 Inline

В установках Premium класса серий XLC, LV/CM и VAC реализован режим «мягкой» паровой фазы с предварительным нагревом и выдержкой изделий при температурах 140 или 180°C для активизации флюсов, содержащих в паяльной пасте. Помимо этого, установки могут содержать дополнительную систему охлаждения, что позволяет сократить цикл пайки, а также модуль вакуумирования, что значительно снижает пустоты в паяных соединениях [6].

Разработаны рабочие жидкости LS200 и LS230 с температурами кипения 200 и 230°C, которые имеют неограниченный срок годности, что позволяет успешно реализовать процесс парофазной пайки в условиях серийного и крупносерийного производства.

6.5. Высокочастотный нагрев для пайки соединений

6.5.1. Выбор частоты нагрева

Для нагрева зоны формирования паяных соединений в настоящее время применяют концентрированные потоки излучения электромагнитных полей в широком частотном диапазоне. Воздействие энергии электромагнитного поля высокой частоты (ВЧ) на паяемые детали и припой проявляется в виде высокопроизводительного бесконтактного нагрева до температуры пайки с помощью наведенных в металле вихревых токов. При этом скорость нагрева может быть увеличена до 10 раз по сравнению с конвективными источниками, зона нагрева локализуется в пределах участка, определяемого конструкцией индуктора. Высокая скорость нагрева токами ВЧ достигается соответствующим выбором частоты тока. Поскольку плотность токов ВЧ по сечению детали распределяется неравномерно, а увеличивается к поверхности вследствие поверхностного эффекта, то глубина их проникновения определяется как:

$$\delta = 503 \sqrt{\rho / \mu f}, \quad (6.20)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление металла, μ – магнитная проницаемость металла, f – частота.

Нагрев электромагнитными колебаниями средней частоты 10–66 кГц с интенсивностью 1–100 МВт/м², при котором отношение глубины проникновения к толщине детали h составляет $\delta/h < 0,5–1,0$, используется для конструкционной пайки волноводных трактов, металлобумажных конденсаторов, коммутационных элементов, твердосплавного инструмента и т.д. [7]. Индукционная пайка электромагнитным полем среднечастотного диапазона имеет преимущественное применение при небольших размерах деталей во всех видах производства.

При нагреве под пайку простых по конфигурации соединений, таких, как цилиндрические или прямоугольные стержни, нагреваемые в кольцевых индукторах, необходимую колебательную мощность генератора (кВт) определяют по формуле [8]:

$$P_r = \frac{cm(T_n - T_H)}{0,24\tau\eta}, \quad (6.21)$$

где c – удельная теплоемкость металла в интервале от исходной температуры до температуры пайки, m – масса нагреваемого металла, кг; T_n – температура пайки, °С; T_H – начальная температура, °С; τ – время нагрева, с; η – КПД индуктора, принимаемый 0,7–0,8 при нагреве стали и 0,3–0,4 при нагреве меди.

Активная удельная мощность ВЧ нагрева, выделяемая в изделии равна:

$$P_2 = 2,0 \cdot 10^{-4} I_1 W_1^2 \sqrt{\rho_2 \mu_2} f F, \quad (6.22)$$

где I_1 – ток индуктора, W_1 – число витков индуктора, ρ_2 и μ_2 – удельное электро-сопротивление и магнитная проницаемость металла, F – функция, зависящая от геометрии индуктора и размеров детали.

Активную мощность, потребляемую индукционной установкой от сети P_c можно выразить через полезную мощность $P_{пол}$:

$$P_c = P_{пол} / \eta_u \eta_{кб} \eta_l \eta_g, \quad (6.23)$$

где η_u , $\eta_{кб}$, η_l , η_g – КПД индуктора, конденсаторной батареи, линии, генератора соответственно.

Полезная мощность составит:

$$P_{пол} = C_{cp} (T_k - T_0) m n / 0,24 \tau_n, \quad (6.24)$$

где C_{cp} – средняя интегральная удельная теплоемкость, T_k , T_0 – конечная и начальная температура, m – масса заготовки, n – число заготовок, τ_n – время нагрева, с.

Полный КПД индуктора

$$\eta_u = \eta_{э} \eta_T \quad (6.25)$$

где $\eta_{э}$ – электрический, η_m – термический КПД индуктора.

$$\eta_T = \frac{P_{пол}}{P_{пол} + \Delta P_T}, \quad (6.26)$$

где ΔP_T – тепловые потери в индукторе.

$$\eta_{э} = \frac{P_{пол} + \Delta P_T}{P_{\Sigma}} = \frac{P_{пол} + \Delta P_T}{P_{пол} + \Delta P_T + \Delta P_{э}}, \quad (6.27)$$

где $\Delta P_{э}$ – электрические потери в индукторе.

Для круглых заготовок диаметром d_2 и диаметра индуктора d_1 .

$$\eta_{э} = \frac{1}{1 + \frac{d_1}{d_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \mu_2}}} \quad (6.28)$$

Практически предельное значение электрического КПД достигается при значениях $d_2/\Delta_2 > 10$ для стали 0,7-0,8, для меди – 0,5.

При пайке микроэлектронных устройств, содержащих металлический корпус и размещенную внутри него подложку или плату с элементами, чувствительными к электрической составляющей поля, энергия электромагнитной наводки должна быть много меньше энергии деградации элементов ИС, которая составляет 10–15 мкДж [9]. На глубине, равной 4, напряженность поля будет ослаблена

в 100 раз по сравнению с поверхностью и на порядок ниже напряженности наводок, приводящих к деградации внутренних элементов (рис. 6.15). Таким образом, выбор частоты при пайке микроэлектронных устройств необходимо осуществлять из условия [10]:

$$\delta \leq h/4, \quad (6.29)$$

где δ - глубина проникновения ТВЧ в металл, h - толщина корпуса.

Нижняя частота тока с учетом соотношения определяется так:

$$f_{\min} \geq 4,05 \cdot 10^{-6} \frac{\rho}{(\mu h^2)} \quad (6.30)$$

Верхний предел частоты тока вытекает из требования максимальной величины термического КПД нагрева, при котором

$$\delta > h/8, \quad (6.31)$$

а также с учетом малых толщин стенок корпуса БИС

$$f_{\max} < 16,2 \cdot 10^{-6} \frac{\rho}{(\mu h^2)}. \quad (6.32)$$

Этим условиям удовлетворяет нагрев энергией высокочастотных электромагнитных колебаний в диапазоне 440–2000 кГц. С повышением частоты нагрева происходит локализация тепловыделения, снижается температурное воздействие на паяемое изделие. Дальнейшее повышение локальности и избирательности нагрева токами ВЧ достигают с помощью магнитопроводов из феррита, устанавливаемых вблизи нагреваемых мест [11]. Воздействие мощного электромагнитного поля на расплавленный припой вызывает его интенсивное перемешивание за счет вихревых токов и пондеромоторных сил, что улучшает растекание припоя.

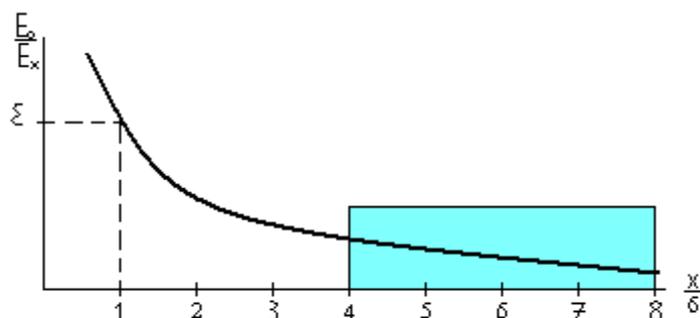


Рис. 6.15. Зависимость электрической составляющей ЭМ поля от глубины проникновения

Воздействие энергии электромагнитных колебаний позволяет осуществить не только высокопроизводительный бесконтактный нагрев деталей и припоя с помощью наведенных в них вихревых токов ВЧ, но и активировать припой и улучшить его растекание по паяемым поверхностям. Качество паяемых соединений в процессах высокочастотной пайки зависит от следующих факторов: скорости нагрева деталей и припоя, избирательности и локальности ВЧ нагрева, равномерности и регулируемости нагрева во времени пайки.

Скорость нагрева токами ВЧ пропорционально мощности, выделяемой в де-

тали:

$$P = \frac{V_{эф}^2 \cdot \eta \cdot \cos \varphi}{R_{дет}}, \quad (6.33)$$

где $V_{эф}$ – эффективное напряжение на индукторе, $\cos \varphi$ – коэффициент мощности нагрева, $R_{дет}$ – электрическое сопротивление детали.

Электрическое сопротивление детали в зоне нагрева определяется как:

$$R_{лн} = \frac{2nl_H \sqrt{\rho \mu f}}{H}, \quad (6.34)$$

где l_H – периметр зоны нагрева детали, H – ширина зоны нагрева.

Таким образом, ВЧ нагрев характеризуется наибольшей эффективностью для металлов, имеющих большое удельное сопротивление и магнитную проницаемость (например, никелевые сплавы), которая уменьшается обратно пропорционально корню квадратному из частоты колебаний. Снижение частоты колебаний увеличивает электродинамический эффект перемешивания расплава.

6.5.2. Методы и устройства высокочастотного нагрева

ВЧ пайка широко применяется в крупносерийном производстве конденсаторов, релейной аппаратуры, трубчатых электронагревателей, коммутационных устройств и волноводных трактов [14]. Коммутационные устройства: контакторы, автоматические выключатели и т.д. – как низковольтные, так и высоковольтные содержат контакты из металлов и сплавов с особыми свойствами на базе серебра, меди, никеля, вольфрама и других элементов. Контакты изготавливают в виде пластин, которые крепят, как правило, пайкой к медному контактодержателю, образуя с ним контактный узел.

Пайка контактных узлов производится в основном твердыми серебрясодержащими припоями с применением ВЧ нагрева. Большая номенклатура и сложность конфигурации контактодержателей затрудняет проектирование нагревательных систем, выбор частоты и мощности источников питания и разработку индукторов. Исходя из требований унификации (на одном посту необходимо паять детали толщиной приблизительно от 0,5 до 5 мм) выбирают генераторы с рабочей частотой 66 кГц или 440 кГц. Области применения ВЧ конструкционной и монтажной пайки приведены на рис. 6.16.

Пайка производится на круглом металлическом столе, где неподвижно смонтированы приспособления для крепления хвостовых частей контактодержателей. Столу сообщается дискретное вращение, т.е. поворот на один шаг (угол между соседними приспособлениями) и выдержка в каждом положении.

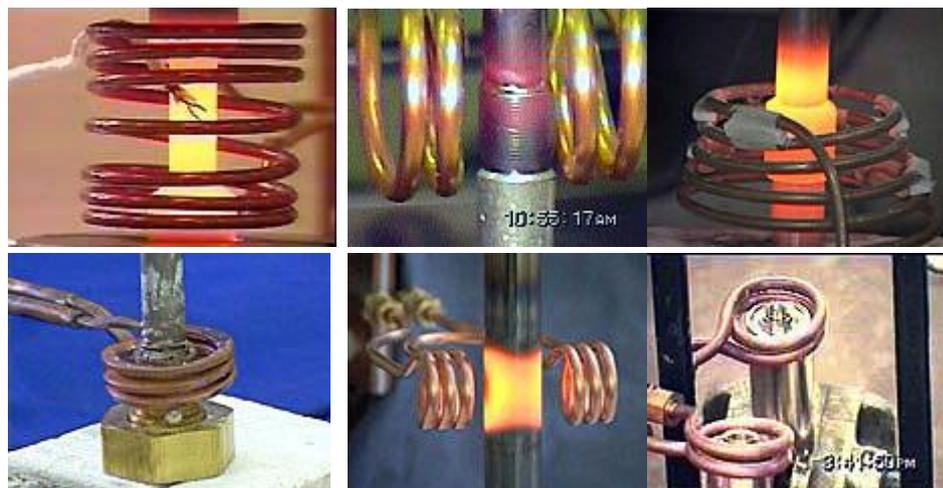


Рис. 6.16. ВЧ нагрев для конструкционной пайки

Производительность станка до 900 паяк в час. Операции загрузки порошкообразной смеси припоя с флюсом, а также контактных пластин механизированы. В зону нагрева, охватывающую три – шесть позиций, паяемые узлы поступают в собранном состоянии.

Для конструкции станка применяют два проходных индуктора. Нагрев узлов, у которых зона пайки контактодержателя не экранируется другими участками, производится в индукторах с односторонним расположением индуктирующих токопроводов. В них нагреваются контактодержатели нескольких типоразмеров различной конфигурации. На частоте 66 кГц достигался равномерный нагрев поверхностей, подлежащих пайке до 700–800 °С за 10–16 с независимо от толщины контактодержателя [15].

Стабильное качество паяных узлов достигнуто при дозировании энергии по времени нагрева при стабилизированных режимах работы генератора. Однако при пайке некоторых типоразмеров контактных узлов возникает брак от 10 до 50% в основном из-за непропаев или вытекания припоя, что является следствием непостоянства температуры заготовок. При дозировании энергии по времени причинами разброса температуры нагрева могут быть: недостаточная стабилизация режимов лампового генератора (генераторы типа ВЧИ-100/0,066 имеют стабилизацию анодного напряжения 1% при колебаниях в сети до 10%, однако напряжение питающей сети может отличаться от номинального на 15- 20%, и этот фактор является трудно устранимым); нестабильное положение паяемых деталей относительно индуктора, определяемое разбросом формы и размеров (массой деталей, точностью механизмов и зажимных приспособлений, величиной люфтов; при этом разброс температуры может быть уменьшен путем увеличения времени нагрева); непостоянство физических свойств (электропроводность, теплоемкость и др.) паяемых деталей.

Для того, чтобы при механизированной индукционной пайке деталей круглой формы: сферических втулок, колец и др. не пользоваться для каждого размера отдельным индуктором, разработан газоохлаждаемый индуктор с взаимоза-

няющимися частями. Такой индуктор для ВЧ пайки в газовой среде, в сравнении с обычным кольцевидным индуктором, более универсален, т.к. все составные части изготовлены, собраны и спаяны из меди. Охлаждение осуществляется водой и защитным газом.

Конструкция базового индуктора предусмотрена с различными вставками для различных труб. Сборка достигается при помощи латунных шурупов (рис. 6.17). Внутренний диаметр базисного индуктора 4 соответствует самым большим трубам 1. При этом измерения вставок 5, 6 и паяемых деталей должны сочетаться. Щель между индукторной вставкой и паяемыми деталями соответствует 2,5 мм. Чтобы достигнуть наиболее равного заполнения паяемой поверхности защитным газом, устанавливается подача газа 8. Для изменения направления защитного газа в верхних вставках устанавливается выступ 7. Расход защитного газа составляет от 200 до 300 л/час. В качестве защитного газа применяется редуцированный газ, H_2/N_2 – смешанный, или формирующий газ с отношением в смеси 1:5 [16].

Включение ВЧ энергии происходит одновременно с подачей защитного газа. Чтобы противодействовать образованию воды из водорода защитного газа от основы карбоната меди под действием влажности при конденсации, необходимо работать с дросселируемым охлаждением, так чтобы индикатор показывал температуру 25 – 35 °С.

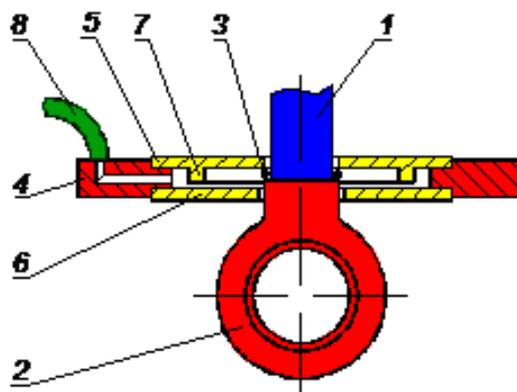


Рис. 6.17. Газоохлаждаемый индуктор: 1 – гидравлическая трубка, 2 – кольцо, 3 – кольцо припоя, 4 – основной индуктор, 5 – верхняя насадка, 6 – нижняя насадка, 7 – выступ, 8 – подвод защитного газа

Для паяльных работ применялся генератор типа GI 15/06 T-035 с бесступенчатой регулировкой мощности от 0 до 15 кВт через тиристорный регулятор переменного тока частотой от 420 до 660 кГц. Рабочий стол служит для крепления зажимного устройства заготовок. При глубине вставки трубки в соответствующий соединительный патрубок от 6 до 8 мм применялся припой с диаметром проволоки от 1 мм при паяльной щели 0,1 мм. Количество защитного газа регулировалось при пайке так, чтобы образующееся слабое газовое пламя выше и ниже индуктора закрывало заготовку на несколько миллиметров. Время пайки 15–25 с составляло при использовании мощности генератора на 35% для различ-

ных диаметров трубок. После пайки защитным газом на заготовках остается только легкий слой оксида и окалины, который без труда удаляется.

При ВЧ нагреве нескольких заготовок с большими расстояниями друг от друга в индукторе, имеющем форму канала, возникает неравномерность нагрева участков заготовок, удаленных от индуктора. Для обеспечения равномерности нагрева заготовки необходимо вращать, что не всегда осуществимо. Для устранения неравномерности нагрева предложено заполнить рабочее пространство индуктора немагнитными вставками с низким электрическим сопротивлением, например, из меди (рис. 6.18). Токи, наводящиеся во вставках, имеют обратное направление, чем в индукторе и вызывают соответствующие токи в заготовках, что повышает эффективность индуктора.

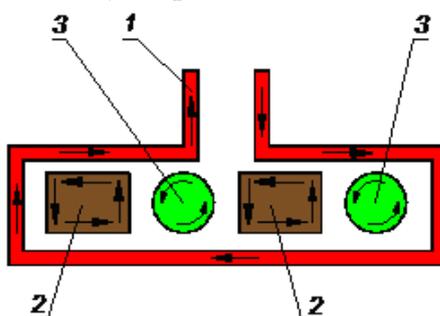


Рис. 6.18. Заполнение рабочего пространства индуктора: 1 – индуктор, 2 – заготовка, 3 – вставка

ВЧ нагрев успешно применяют для пайки магнитострикционных преобразователей тугоплавкими серебрясодержащими припоями. Для этого используют ВЧ генератор мощностью 25 кВт, работающий на частоте 66 кГц. При ВЧ нагреве одновитковым индуктором пластинчатый припой расплавляется, и для формирования равномерного соединения к преобразователю прикладывают определенное внешнее усилие (рис. 6.19).

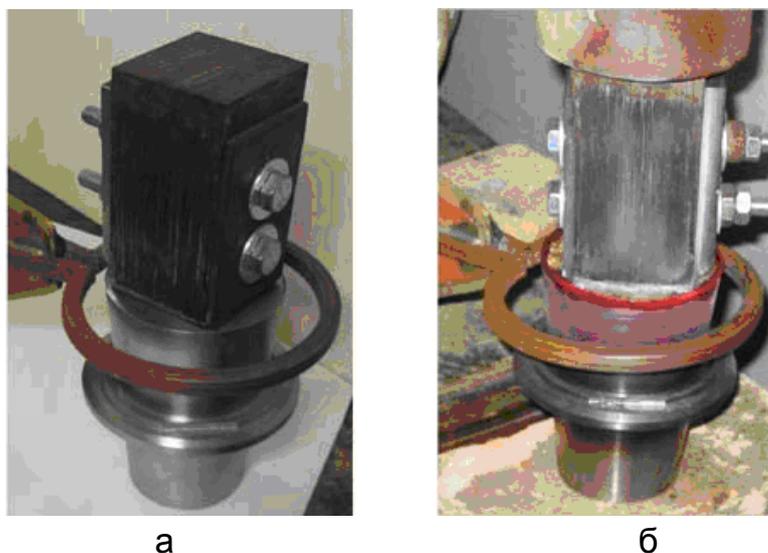


Рис. 6.19. ВЧ пайка магнитострикционного преобразователя

Технологический процесс герметизации корпусов БИС и микросборок включает подготовку корпусов и крышек к пайке, сборку корпуса в приспособлении, высокочастотную пайку, контроль качества паяного шва и герметичности корпуса. Подготовка корпусов крышек к пайке заключается в обезжиривании и горячем лужении паяемых поверхностей припоем ПОС61. После лужения остатки флюса удаляют промывкой в спиртобензиновой смеси. При сборке корпуса 4 в приспособлении 3 крышку 2 прижимают к корпусу с усилием 1–3 Н с помощью защитного экрана 1, а индуктор 5 помещают на расстоянии 2–3 мм от крышки. С выхода ВЧ генератора напряжение с помощью токоподводов подается на индуктор (рис. 6.20). ВЧ пайку корпусов БИС и микросборок ведут при анодном токе генераторной лампы 1,0–1,3 А, сеточном токе 0,3–0,6 А, на частоте колебаний 440 ± 10 кГц в течение 3–5 с [12].

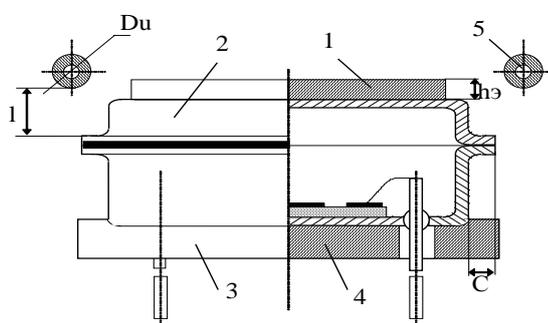


Рис. 6.20. Схема ВЧ пайки корпусов БИС

Для исключения попадания флюса во внутренний объем приборов используют 2-х этапный процесс и аэрозольное флюсование с помощью спреера.

Для герметизации полупроводниковых приборов ВЧ пайкой в серийном производстве был применен индуктор на незамкнутом магнитопроводе (рис. 6.21), который концентрирует излучение в области зазора. Магнитопровод индуктора состоит из 2-х сердечников 1 и 2 ферромагнитного материала, в зазоре которых производится нагрев деталей. Рабочая обмотка 3 охватывает оба сердечника и подключена к ВЧ генератору 4. Обмотка подмагничивания постоянным током состоит из 2-х секций 5 и 6 и подключена с помощью переключателя 7 к выходу усилителя 8 постоянного тока или ко входу регулирующего выпрямителя 9. Вход усилителя 8 подключен к выходу сравнивающего устройства 10, один из входов которого подключен к выходу выпрямителя 11, подключенного к обмотке 12 обратной связи, а второй - к источнику 13 опорного напряжения.

В основу регулирования положена зависимость магнитной проницаемости магнитопровода на переменном токе от величины подмагничивания постоянным током. Увеличивая ток подмагничивания, изменяют магнитную проницаемость магнитопровода, а, следовательно, напряженность ВЧ поля в зазоре магнитопровода.

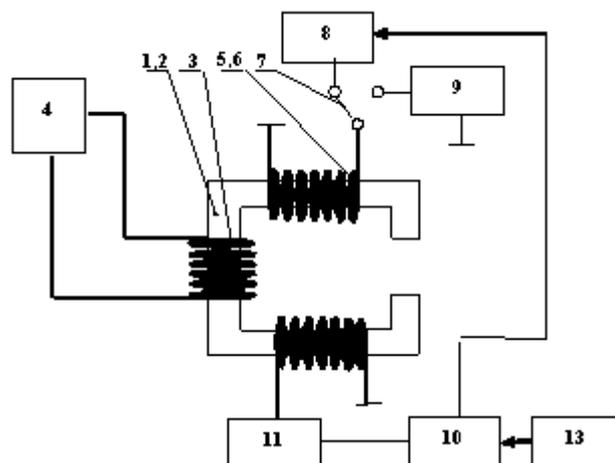
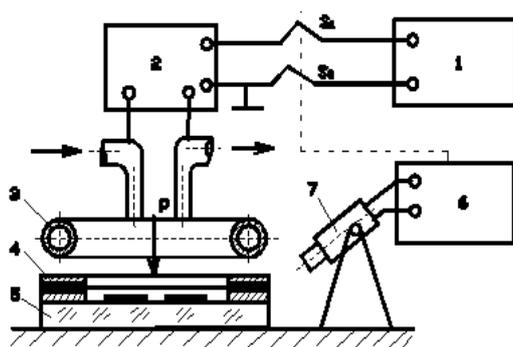


Рис. 6.21. Схема индуктора на незамкнутом магнитопроводе

Вибрационный эффект ВЧ нагрева на частотах более 440 кГц в жидком припое крайне незначителен и не оказывает влияние на растекание припоя. В этом случае более эффективно применение УЗ колебаний в комбинации с ВЧ нагревом. При ВЧ пайке телескопических соединений в одном из элементов возбуждают УЗ крутильные колебания с помощью двух акустических волноводов [13].

Повышение качества паяных соединений и улучшение смачивания паяемых поверхностей достигают модуляцией ВЧ колебания в диапазоне 100–1000 кГц низкочастотным сигналом 18–66 кГц от внешнего источника с глубиной модуляции 20 – 100% (рис. 6.22) [17]. Схема содержит источник 1 НЧ колебаний, ВЧ генератор 2, индуктор 3, паяемые детали (рамку 4 и подложку 5 с толсто пленочной металлизацией), устройство управления 6 и пирометр 7. Бесконтактный ввод УЗ колебаний при ВЧ нагреве способствует формированию качественных паяных соединений за счет полного заполнения швов в соединениях.



а



б

Рис. 6.22. Схема (а) и рабочее место ВЧ пайки (б)

При ВЧ нагреве важно оперативно регулировать скорость нагрева так, чтобы паяемые детали и припой одновременно достигали температуры пайки. На индуктор подают ВЧ напряжение и нагревают изделие (участок I на рис. 6.23). После расплавления припоя (точка а) снижают интенсивность ВЧ нагрева в зависи-

мости от требуемого температурного режима процесса пайки (участок II), что позволяет избежать перегрева припоя, а также снизить нагрев изделия. Затем ВЧ напряжение отключают и изделие охлаждают (точка b, участок III).

Для пайки рамки 1 к плате микросборки 2 разработано устройство (рис. 6.24), содержащее прижим 3, индуктор 5, кассету 4, теплоизолирующую плату 6. Расположение индуктора под платой исключает случайное прикосновение к нему в процессе пайки, перемещение кассеты может быть автоматизировано с помощью транспортного устройства. Нижнее расположение индуктора отличается более пологой характеристикой нагрева, что исключает перегрев БИС, а также прикосновение к индуктору, что повышает безопасность в работе.

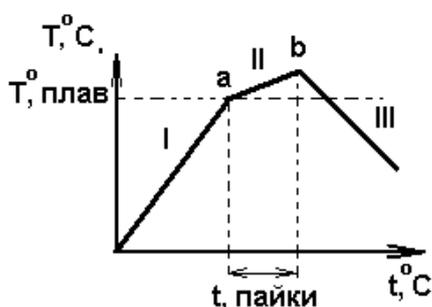


Рис. 6.23. Температурный профиль ВЧ пайки

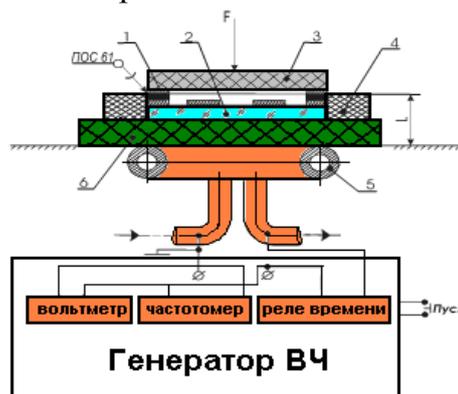


Рис. 6.24. Устройство ВЧ пайки микросборок

Индукционный нагрев успешно применен для присоединения оплавлением шариков бессвинцового припоя диаметром 0,76 мм к контактным площадкам платы, имеющим покрытие никелем 10 мкм и золотом 0,05 мкм. Шарики вручную размещались на подложке, а затем вместе с подложкой нагревались в центре витка индуктора (рис.6.25). Частота тока составляла 300 кГц, величина тока варьировалась от 11 до 29 А. Температура оплавления припоя достигалась при токе индуктора 17 А за 12 с и токе 27 А за 3с [18].

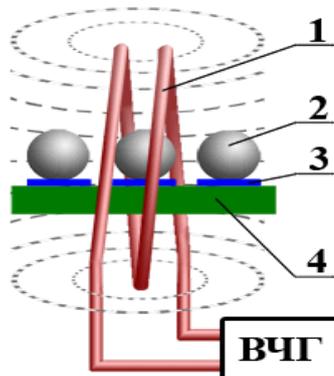


Рис. 6.25. Схема индукционного нагрева для формирования шариков припоя: 1 — индуктор, 2 — шарик, 3 — контактная площадка, 4 — плата

6.5.3. Оборудование и оснастка для высокочастотного нагрева

Для ВЧ нагрева применяют генераторы с выходной мощностью до 25 кВт, которые состоят из генератора, рабочего стола или электрически связанной машины пайки, установленных стационарно. Схема ВЧ ламповой установки, работающей в режиме самовозбуждения с двойным преобразованием тока, приведена на рис. 6.26.

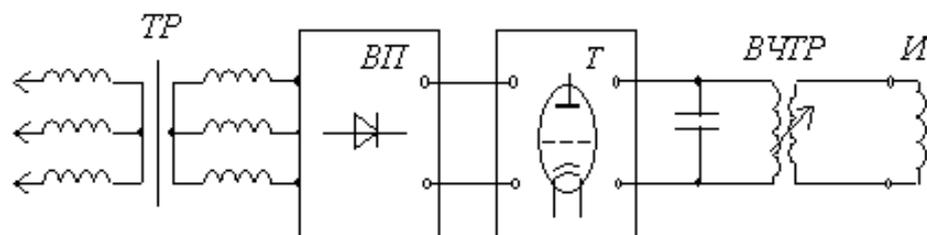


Рис. 6.26. Схема ВЧ ламповой установки для пайки

Индукционные устройства полуавтоматического действия для пайки электронных компонентов на плате и деталей разъемов приведены на рис. 6.27.

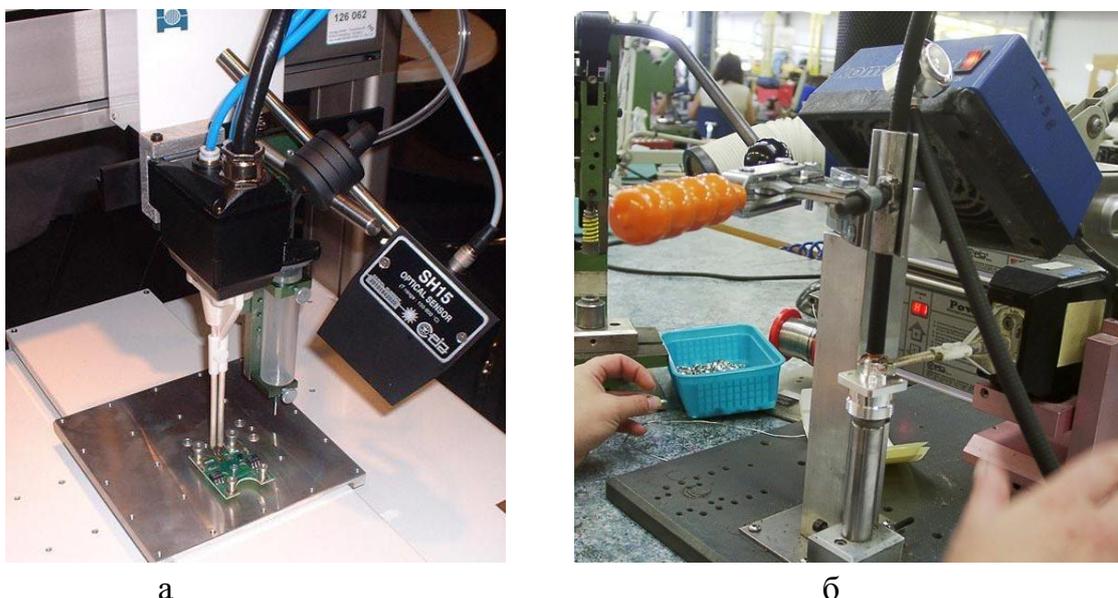


Рис. 6.27. Индукционные устройства для пайки электронных компонентов на плате (а) и деталей разъемов (б)

Применение ВЧ нагрева для пайки в производстве изделий электроники имеет хорошие перспективы в виду возможности гибкой автоматизации процесса путем использования программно-управляемого ВЧ оборудования, транспортных устройств и управляющих микроЭВМ. В настоящее время широкое применение для ВЧ нагрева получили транзисторные генераторы, работающие в диа-

пазонах средних (66 кГц) и высоких частот (440 и 1760 кГц) (рис. 6.28).



Рис. 6.28. Современные типы транзисторных ВЧ генераторов мощностью до 10 кВт

Для исключения ошибок в согласовании ВЧ генераторов и обеспечения оптимальных режимов ВЧ нагрева применяют моделирование ВЧ нагревательной системы с помощью пакета Advanced Design System (ADS) фирмы Agilent Technologies. Измерив параметры индуктора: индуктивность L , активное R_i и реактивное сопротивление на рабочей частоте вводят эти данные в программу и в результате расчета получают временные зависимости тока и напряжения в индукторе, а также данные о КПД нагреве, мощности, выделяемой при нагреве в детали и в индукторе. При неполной компенсации реактивной составляющей сопротивления индуктора наблюдаются сдвинутые во времени максимумы тока и напряжения в цепи индуктора, и КПД нагрева медных сплавов не превышает 32–36% [19]. Изменяя величину компенсирующего конденсатора добиваются на рабочей частоте ВЧ нагрева синфазности максимумов тока и напряжения, что увеличивает КПД до 60%.

Как ламповые, так и тиристорные индукционные установки очень требовательны к параметрам выходного колебательного контура, который, как известно, определяется емкостью конденсатора, индуктивностью индукционной катушки и частотой генерации. Частота генерации в предыдущих поколениях индукционных установок если и менялась вообще, то в очень узких пределах. ГОСТ задавал это значение в плюс минус 10%. И поэтому эксплуатационникам приходилось с большой точностью подбирать резонанс индукционной установки с помощью изменения количества витков и диаметра индуктора (индукционной катушки) либо когда это было невозможно, например, в индукционной плавильной печи, с помощью переключения секций конденсаторных батарей [12].

ВЧ генератор фирмы SEREN R5001, представленный на рис. 6.29,а, применяется во многих отраслях промышленности и в научных лабораториях, генерирует мощность 5000 Вт, позволяет регулировать частоту в диапазоне 1.7–2.1 МГц.



а б
Рис. 6. 29. ВЧ генераторы R5001 (а) и Adtec TX30 (б)

Элементы контроля и управления ВЧ генератором сгруппированы в логические группы, а дисплей выводит всю необходимую для работы и контроля информацию (значение генерируемой мощности, значение отраженной мощности, частоту подаваемого напряжения, и т.д.). В генераторе ВЧ усилитель и управляющая система смонтированы на единой плате. Питание ВЧ усилителя осуществляется от импульсного источника питания. Каскад усилителя мощности и задающий контур генератора выполнены на полевых транзисторах, а сам прибор обеспечивает стабильность работы и точность подаваемой энергии во всем диапазоне подаваемых мощностей согласно классу АВ (по международной классификации для приборов этого класса), что дополнительно гарантирует высокий класс данного ВЧ генератора.

Номинальная мощность (5 кВт) ВЧ генератора составляет всего 70% от его максимальной мощности. Генератор позволяет регулировать свою выходную мощность, работая в одном из следующих управляющих режимах: постоянное напряжение смещения, ВЧ напряжение, стабилизация по подаваемой мощности, стабилизация по мощности нагрузки [13]. Характеристики ВЧ генератора R5001, а также генератора фирмы Adtec TX30 (рис. 6.29,б) представлены в табл. 3[14].

Таблица 3. Технические характеристики ВЧ генераторов

Параметр	R5001	Adtec TX30
Выходная мощность, Вт	5000	3000
Регулируемая частота, МГц	1,7 – 2.1	1,1 – 2.1
Электропитание, В	380 – 440	220–240
Водяное охлаждение, л/мин	23	4
Габаритные размеры, см	22x43x67	21,5x55,8x17.7
Вес	38,5	40

Характеристики ВЧ генераторов фирмы UltraFlex ULTRAHEAT SB (рис. 6.30,а) и фирмы DaWei DW-UHF-3.2KW (рис.6.30,б) представлены в табл. 4 [16,17].



Рис. 6.30. ВЧ генераторы UltraFlex ULTRAHEAT SB (а) и DaWei DW-UHF-3.2KW (б)

Таблица 5. Технические характеристики ВЧ генераторов

Параметр	UltraFlex ULTRAHEAT SB	DW-UHF-3.2KW
Выходная мощность, Вт	3000	3200
Регулируемая частота, МГц	0,017 – 3	1,1 – 2.0
Электропитание, В	220	220
Водяное охлаждение, л/мин	10	4
Габаритные размеры, см	360x360x300	320x190x400
Вес	43	20

В настоящее время необходимы мощные, бесконтактные паяльные системы, пригодные как для интегрированного производства, так и для автономного применения. Индукционные паяльные системы компании iTherms Technologies (США) [20] обеспечивают способность быстрого нагрева локализованной зоны деталей, что устраняет различные металлургические и механические изменения в конструкции. Способность нагрева только локальной зоны предотвращает вытекание припоя из намеченного места присоединения деталей. Высокая надежность и повторяемость соединений достигаются вследствие высокой точности контроля мощности ВЧ генератора, не более 1% от установленного уровня мощности и временным разрешением до 100 мс.

Традиционные мощные источники индукционного нагрева основаны на больших токах в индукторе при низких напряжениях и высокой частоте для генерации переменного магнитного поля, которое создает вихревые токи в нагре-

ваемой детали. Традиционные индукционные нагревательные индукторы конструируются из медной трубки и охлаждаются водой.

Индукционные устройства типа НІG (Harmonic Inductive Gain) основаны на более низких токах в индукторе при несколько больших ВЧ напряжениях, создаваемых портативными ВЧ генераторами (рис. 6.31). НІG индукционные нагревательные устройства конструируют с помощью магнитопроводов из феррита с незамкнутой магнитной цепью (рис. 6.32), а для обмоток применяют высокоэффективный на частотах порядка 500 кГц многожильный провод Litz (литцендрат). Источники питания и индукторы имеют воздушное охлаждение, что является большим преимуществом.



Рис. 6.31. Высокочастотный генератор с автоматическим контролем частоты, мощности и времени нагрева



Рис. 6.32. Индукционное устройство на незамкнутом магнитопроводе

Индукционные устройства типа НІG применены для пайки коаксиального кабеля к коннектору при мощности нагрева 250 Вт и времени пайки 2,5 с (рис. 6.33, а) и проводов к электронному модулю при мощности 190 Вт (рис. 6.33, б). При пайке трех проводов к плате тепло фокусируется таким образом, что изоляция на проводах не расплавляется.

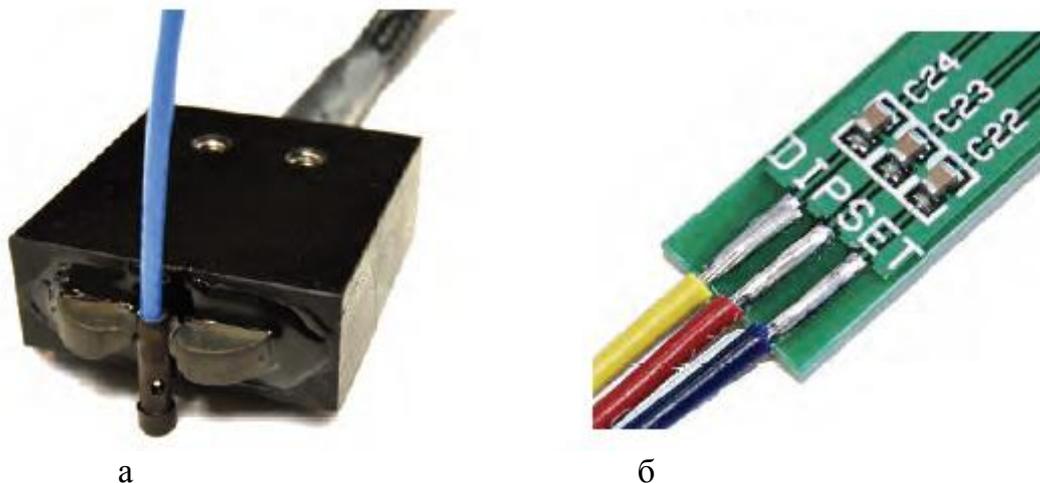


Рис. 6.33. Пайка коаксиального кабеля (а) и проводов к плате (б)

С помощью измерителя-ПИД-регулятора ОВЕН ТРМ210 и персонального компьютера, подключенного через преобразователь интерфейса АС4, исследованы температурные профили индукционного нагрева силовых контактов на плате в зависимости от коэффициента перекрытия зазора магнитопровода индуктора на частоте электромагнитных колебаний 66 кГц и анодном токе генератора 1,75 А (рис. 6.34).

Исследованы зависимости температуры нагрева объекта от коэффициента перекрытия зазора при амплитуде напряжения на индукторе 150 В и частоте электромагнитных колебаний 66 кГц. При коэффициенте перекрытия $K \leq 0,25$ нагрев неэффективен.



Рис. 6.34. Рабочее место исследования индукционного нагрева в зазоре магнитопровода

Деталь нагревается в течение продолжительного времени (более 30 с), так как в ней индуцируется малая плотность вихревых токов и мощности нагрева не хватает на то, чтобы компенсировать потери тепла в окружающую среду. При $K > 4$ эффективность нагрева также снижается в связи с уменьшением зоны нагрева и передачи части тепла за счет теплопроводности.

Скорость нагрева электромагнитным полем растет в зависимости от частоты, поскольку уменьшается глубина проникновения электромагнитного поля в проводящий материал и в большей степени выражен поверхностный эффект нагрева. Максимальная скорость нагрева при полной выходной мощности генератора достигает $40^{\circ}\text{C}/\text{с}$ на частоте 66 кГц, что позволяет реализовать высокоэффективный бесконтактный нагрев небольших по размеру деталей в зазоре магнитопровода индуктора и почти в 2,5–3,0 раза повысить производительность труда по сравнению с пайкой паяльником (рис. 6.35) [21].

Индукционное устройство применено для герметизации пайкой корпусов интегральных схем (ИС) с планарными выводами в корпусе типа 101МС14-1, изготовленных из сплава 29Н19Ж с гальваническим покрытием сплавом оловоникель толщиной 6 мкм, с использованием припоя ПОС61 и спиртоканифольного флюса. Нагрев корпуса осуществлялся в зазоре магнитопровода сечением 200 мм^2 при напряжении на индуктирующей обмотке 200 В. Через 3 с нагрева припойная прокладка расплавлялась и с этого момента времени в обмотку подавался ток подмагничивания частотой 50 Гц и амплитудой 5 А в течение 1–2 с. Вследствие вибрации крышки припой заполнял зазор в соединении и образовывал равномерные галтели по периметру паяного шва.

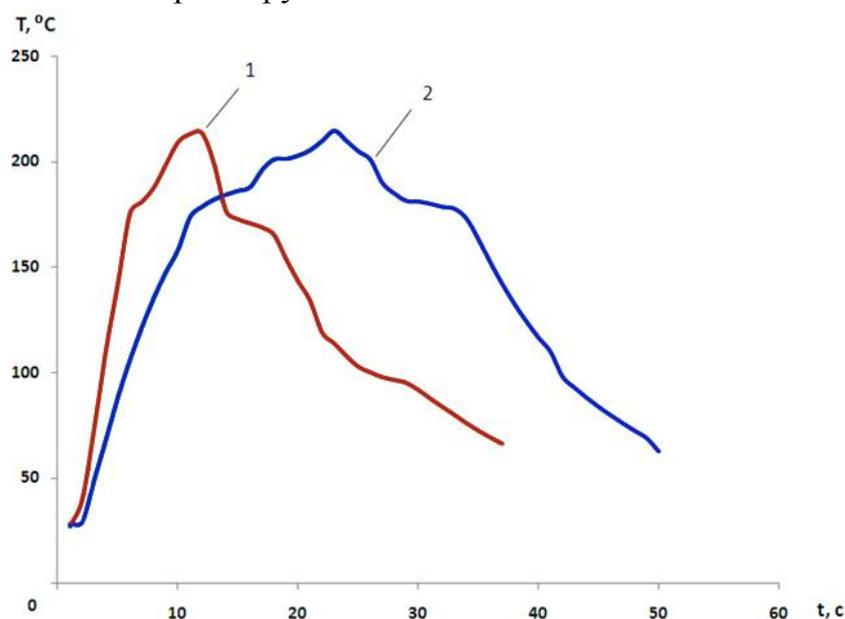


Рис. 6.35. Температурные профили нагрева индукционным устройством (1) и паяльником 40 Вт (2) силового контакта на плате

Индукционное устройство применено для пайки контактов при сборке силового электронного модуля (рис. 6.36). На места соединений наносилась при-

пойная паста ПП-250. Пайка каждого контакта осуществлялась в течение 8–10 с.



Рис. 6.36. Силовые контакты на печатной плате

Очень эффективным решением, которое было запатентовано компанией ОК International как технология Smart Heat, явилось использование индукционного нагрева в паяльнике. В основе метода лежит нагрев наконечника паяльника переменным магнитным полем. Собственно наконечник изготовлен из меди с ферромагнитным покрытием в его хвостовой части, которая в тоже время является сердечником катушки, создающей постоянно действующее переменное магнитное поле (рис. 6.37). Наконечник нагревается за счет наведенных поверхностных токов. При температуре точки Кюри ферромагнетик теряет свои магнитные свойства, нагрев прекращается, и температура стабилизируется.

В момент касания платы температура наконечника падает, магнитные свойства материала мгновенно восстанавливаются, и наконечник вновь начинает поглощать энергию из магнитного поля, стремясь удержать температуру в точке Кюри. Чем более теплоемкий контакт приходится паять, тем больше энергии будет поглощено из поля.

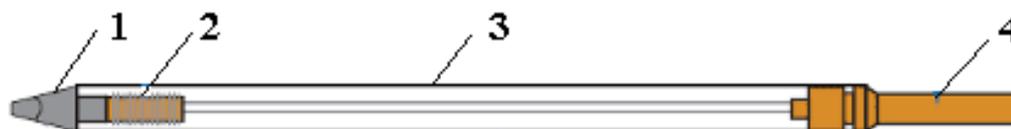


Рис. 6.37. Схема индукционного паяльника: 1 – наконечник, 2 – обмотка индукционного нагревателя, 3 – экранирующий кожух, 4 – разъем

Таким образом, индукционный паяльник «подбирает» требуемую мощность для нагрева каждого контакта в зависимости от его теплоемкости. Миниатюрный инструмент с индукционным нагревателем мощностью всего 35 Вт на многослойной плате работает так, как некоторые классические паяльники вдвое большей мощности.

На рис. 6.38 представлены температурные циклы паяльника классической и индукционной паяльных станций. Испытания проводились на печатной плате, размеры точек пайки $1,6 \times 5,0$ мм, периодичность пайки – каждые 3 с [22].

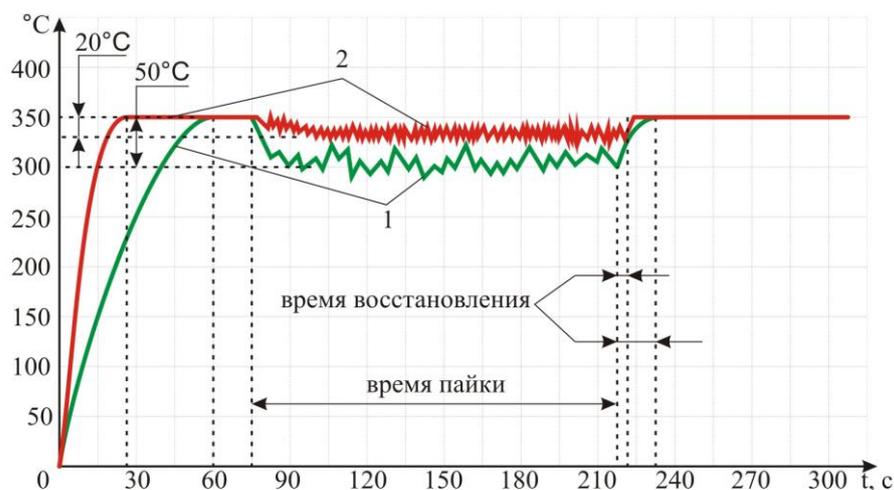


Рис. 6.38. Температурные циклы классического (1) и индукционного (2) паяльника

Основные достоинства индукционных паяльников:

- возможность настройки заданной температуры наконечника (за счет подбора материала с нужной температурой Кюри);
- небольшое потребление мощности (происходит нагрев не всего объема наконечника, а только поверхностного скин-слоя);
- равномерный нагрев наконечника, отсутствие температурной инерции (из-за отсутствия нагревательного электрода, поверхностный слой наконечника сам является нагревателем);
- простота замены наконечника при нарушении его целостности (за счет отсутствия высоких требований к контакту с индуктивной обмоткой).

Серийно выпускаемые индукционные паяльные станции китайского производителя Quick и американского – OK International преобразуют напряжение питания сети в прямоугольное напряжение амплитудой 36 В с частотой 400 кГц. Это напряжение подводится к возбуждающей обмотке, обладающей минимальным активным сопротивлением (не более 1,3 Ом) и большим реактивным сопротивлением (не менее 50 мГн), причем, индуктивность обмотки без жала в 100 раз меньше. При таких условиях, что мощность, передаваемая от паяльной станции на 80–85% передается самому жалу, включенному как трансформатор с закороченной вторичной обмоткой. Оставшиеся 15–20% мощности разогревают обмотку возбуждения, которая находится снаружи жала, кондуктивно нагревая при этом жало [23].

Паяльные станции Quick–203 мощностью 60 и 90 Вт разогревают жало до температуры 300°C за 25–35 с и имеют диапазон рабочих температур от 200 до

420°C. Станции Quick-301(303) применяются для пайки припоями, не содержащими свинец. В этих станция мощностью 80 Вт термопара размещена на окончнике паяльника и имеется микропроцессорный регулятор температуры.

Паяльная станция PS-800 (рис. 6.39) американской компании OK International при мощности 50 Вт имеет такую же теплоотдачу, как 90 Вт паяльник с керамическим нагревателем.



Рис. 6.39. Индукционная паяльная станция PS-800

6.6. Инфракрасный нагрев

6.6.1. Особенности инфракрасного нагрева

Под лучистой энергией понимают энергию оптической области спектра электромагнитных излучений с длинами волн 0,01–840 мкм, который делится на инфракрасную (340–0,77), видимую (0,77–0,38), ультрафиолетовую (0,38– 0,01). В общем случае поток лучистой энергии, достигая поверхности тела, частично поглощается, частично отражается и частично проходит через это тело:

$$F_{над} = F_{погл} + F_{отр} + F_{пр}. \quad (6.35)$$

Специфика нагрева металла лучистой энергией определяется высокой концентрацией в них свободных электронов, которые служат источниками вторичных волн. Коэффициент отражения и поглощения зависит от длин волн, электропроводности металла и температур. С увеличением частоты колебаний световой волны отражающая способность металлов уменьшается и большая часть излучения поглощается, таким образом, энергетически выгодно использовать более коротковолновую часть спектра. Энергетическими параметрами пучка лучистой энергии являются: максимальная плотность лучистого потока в центре фокального пятна E_{2m} , Вт/см²; энергетическая мощность излучателя (лампы) P_l (Вт); энергетическое КПД η (%); коэффициент сосредоточенности лучистого потока K (1/см²) [24].

Эти параметры определяются пространственным распределением плотности лучистого потока в фокальном пятне на двунаправленных направлениях $E_2(x, y)$ или по радиусу пятна $E_2(r)$. Распределение плотности лучистого потока в фокальном пятне оптического источника теплоты описывается уравнениями:

- для нормально-кругового источника:

$$E_2(r) = E_{2m} e^{-kr^2} \quad (6.36)$$

- для нормально-полосового источника ограниченной длины l :

$$E_2(x, y) = E_{2m} e^{-ky^2}, \quad D \leq X \leq l \quad (6.37)$$

Интегральный лучистый поток в фокальном пятне определяют по уравнениям:

- для нормально-кругового источника:

$$F = \int_0^{\infty} E_2(r) 2\pi r dr = \frac{\pi}{k} E_{2m}, \quad (6.38)$$

- для нормально-полосового источника ограниченной длины:

$$F = \int_{-\infty}^{\infty} E_2(x, y) l dy = \sqrt{\pi} \frac{E_{2m}}{\sqrt{k}}. \quad (6.39)$$

Пайка инфракрасным (ИК) излучением обеспечивает возможность бесконтактного нагрева на воздухе, в контролируемой газовой среде или в вакууме. Интенсивность спектрального излучения I зависит от температуры T , длины волны источника и спектральной степени черноты излучателя:

$$I_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}, \quad (6.40)$$

где C_1, C_2 – постоянные Планка, соответственно $3,74 \text{ мВт/м}^2$ и $0,1439 \text{ м} \cdot \text{К}$.

Температура нити кварцевых ламп с иодным циклом составляет обычно $2000\text{-}3500\text{К}$, а диапазон теплового лежит в пределах длин волн $0,76\text{-}1000 \text{ мкм}$. Падающее на металлическую поверхность ИК излучение незначительно проникает вглубь и в основном отражается от его поверхности. Нормальная отражательная способность гладких поверхностей чистых металлов зависит от их электропроводности ρ и температуры поверхности T :

$$\xi = 1 + 0,1\rho T. \quad (6.41)$$

В ИК области спектра с увеличением электропроводности металлов их отражательная способность возрастает до 98% . Среди чистых металлов полированное серебро, медь, алюминий являются лучшими отражателями и используются для изготовления рефлекторов в установках ИК нагрева, которыми осуществляют фокусировку излучения.

Нагрев ИК излучением в целях пайки имеет ряд технологических преимуществ, однако их реализация зависит от правильно сконструированной установки ИК нагрева. В настоящее время широкое применение в технологических процессах пайки получили два вида ИК нагрева: локальный сфокусированный и прецизионный рассеянный. В зависимости от конкретных условий используют

различные по геометрии рефлекторы, формирующие тепловое поле в зоне нагрева. Для локального нагрева целесообразны отражатели эллиптической формы, фокусирующие излучение источника света, помещенного в ближнем фокусе рефлектора на объект нагрева в дальнем фокусе (рис. 6.35, а). В зависимости от типа излучателя 1 рефлекторы 2 формируют фокальное пятно в виде круга (для точечных), либо полосы (для линейных излучателей) (рис. 6.35, б), причем плотность ИК излучения, а следовательно, и температура в фокальном пятне убывает по мере удаления от центра по закону, близкому к закону Гаусса.

В условиях прецизионного нагрева достигается высокая равномерность температуры в результате многократных переотражений излучения объекта. Для установок периодического или непрерывного (конвейерного) типа используются овално-цилиндрические рефлекторы, которые особенно эффективны для низкотемпературной групповой пайки. Для ограничения зоны нагрева и снижения температурного влияния на компоненты применяют сопловые насадки с внутренней отражающей поверхностью (рис. 6.35, в), либо защитные диафрагмы.

Источниками ИК излучения являются галогенные лампы мощностью 100–650 Вт для точечных и 1000–5000 Вт для полосовых излучателей. Для галогенной лампы КИ-220-1000 при напряжении 220В максимальная спектральная интенсивность излучения достигает 63 Вт/стер·мкм на длине волны 1,1 мкм. Применение сфокусированного ИК излучения позволяет осуществить локальный нагрев в зоне диаметром 2–3 мм или узкой полосе шириной до 5 мм со скоростью 30–50 град/с при интенсивности излучения 100–120 Вт/см².

Для ИК нагрева в технологии ИЭ в большей степени используется узкий диапазон длин волн от 1 до 5 мкм, который в свою очередь делится на коротковолновый от 1 до 2,5 мкм и средневолновый от 2,5 до 5 мкм.

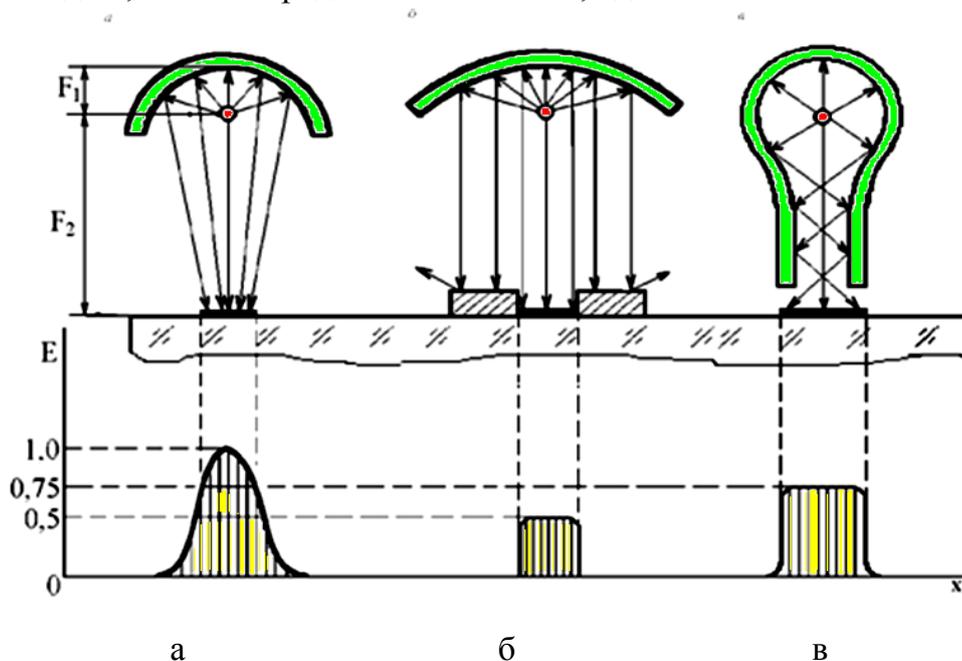


Рис. 6.35. Отражатели ИК излучения: фокусирующий (а), диффузный (б), с сопловой насадкой (в)

Коротковолновый диапазон ИК излучения позволяет более быстро нагревать объекты, поскольку согласно закону смещения Вина максимальная величина спектральной интенсивности излучения с повышением температуры сдвигается в сторону более коротких волн.

Для защиты поверхности отражателя и лампы от паров флюса предусмотрено использование либо съемного кварцевого стекла, либо прокачка горячего воздуха в пространстве между отражателем и диаграммой. При непрерывной длительной работе рефлектор охлаждается водой с расходом 0,4 л/мин.

Способ пайки ИК излучением высокопроизводителен, инвариантен к типу паяемого изделия (корпус ИС, печатная плата), экологически чист (не загрязняет окружающую среду), позволяет программировать режимы нагрева и вести пайку в любой контролируемой атмосфере, например нейтральной или защитной.

ИК нагрев, обеспечивая высокие скорости нагрева изделий, создает и значительные температурные градиенты, которые отрицательно влияют на надежность электронных сборок, выполненных на керамических подложках. Лучшим компромиссом для пайки керамических плат является сочетание нагрева нижней стороны платы теплопроводностью до 140°C, а верхней – ИК излучением. При этом температурные градиенты не превышают 1–4°C/с. Недостатками ИК нагрева являются: низкая локальность зоны нагрева, недостаточная интенсивность, повышенное время пайки, нагрев не только паяного соединения, но и обширной прилегающей зоны, что приводит к термической деструкции диэлектрика печатной платы, а также электронных компонентов. Во избежание термического разрушения печатной платы применяют специальные защитные маски, металлические экраны, теплоотводящие оправки.

6.6.2. Оборудование инфракрасного нагрева

ИК нагрев давно применяется в электронной промышленности для пайки низкотемпературными припоями в среде инертных газов, термообработки ИМС, сушки клеев, лаков, компаундов [25]. Разработан ряд печей конвейерного типа различной конструкции, мощности, габаритов и способа нагрева для сушки и отжига ИЭТ при температурах до 600°C, для пайки электронных компонентов на платы при монтаже микросборок, гибридных интегральных схем, а также для сборки и герметизации ИЭТ.

Современные установки ИК пайки, снабжены микропроцессорной системой управления с функциональной клавиатурой и дисплеем, обеспечивающих регулирование и отслеживание всех параметров процесса. В них имеется от 6 и более зон ИК нагрева, зона УФ нагрева и зона охлаждения вентиляторами.

В технологии ИК пайки применяются три разновидности конструкций установок, отличающихся видом нагревателей: ламповыми, панельными и с их комбинированным применением. Установка с ламповыми излучателями содержит

зону нагрева, в которой установлен ряд трубчатых ИК ламп, снизу и сверху транспортера, на котором размещаются монтируемые платы (рис. 6.36).

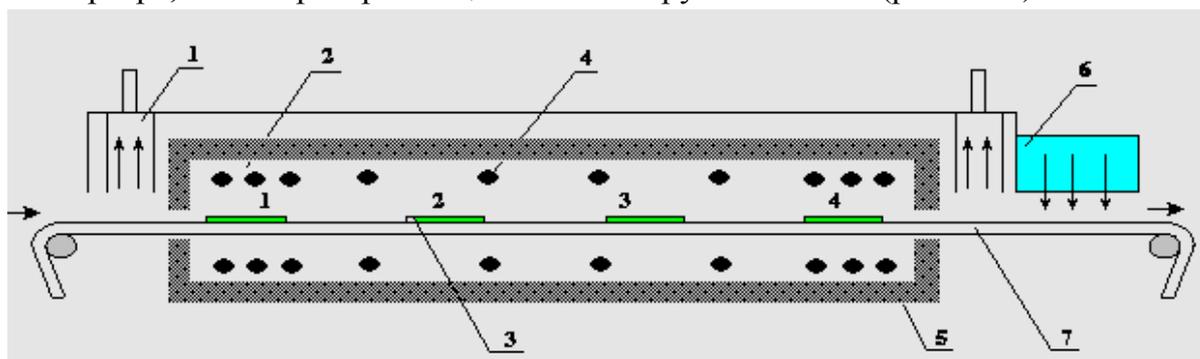


Рис. 6.36. Установка ИК лампового нагрева: 1 – вытяжная вентиляция, 2 – матрица ИК ламп, 3 – плата, 4 – ИК лампа, 5 – отражатель, 6 – устройство охлаждения, 7 – конвейер

Лампы заключены в отражающий рефлектор и зоны нагрева образуются наборами ламп. В зоне предварительного нагрева и зоне оплавления располагается большее количество ламп, что позволяет создать большую плотность ИК излучения. Во второй зоне лампы располагаются реже, что обеспечивает плавный режим нагрева и выравнивание температуры компонентов. Для удаления летучих соединений на выходе и входе из зоны нагрева находится система вытяжной вентиляции, а выходе – принудительного охлаждения плат.

Аналогичную конструкцию имеют установки с панельным ИК нагревом (рис. 6.37), которые отличаются заменой ИК ламп керамическими панелями различной мощности, что также позволяет осуществлять формирование необходимого температурно-временного профиля нагрева, но не с такой степенью гибкости. Конструкция ИК панельного нагревателя включает в себя три слоя. Лицевая сторона, обращенная к нагреваемой плате, может изготавливаться из стекла, керамики или металла. В зависимости от применяемого материала она может выполнять функции вторичного излучателя или прозрачного окна. В первом случае излучающие свойства будут уже определяться не первичным нагревателем, а материалом лицевого слоя.

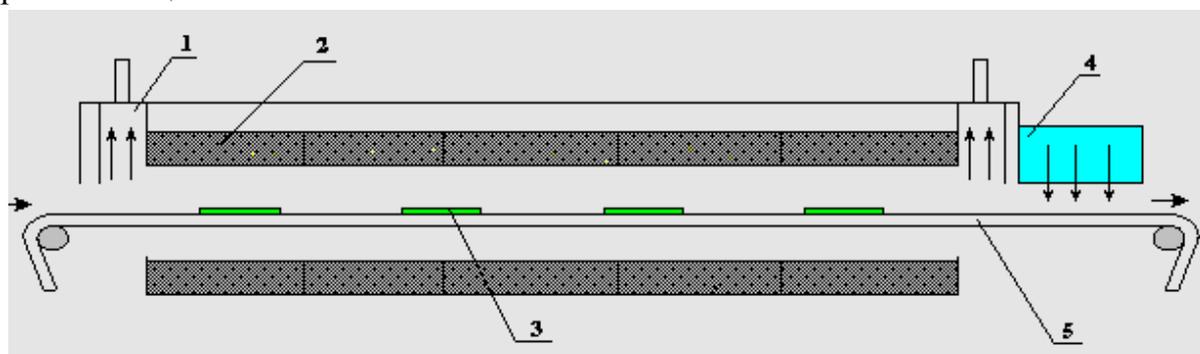


Рис. 6.37. Установка ИК панельного нагрева: 1 – вытяжная вентиляция, 2 – панельные нагреватели, 3 – устройство охлаждения, 4 – конвейер, 5 – плата

Второй слой или первичный нагреватель обычно изготавливается в виде фольги или спирали из резистивного материала. Третий слой является изоляционным и выполняется из тугоплавкой керамики.

В ИК установке панельного типа нагрев производится как за счет излучения, так и за счет конвекции, потому что ИК излучение в спектре 5-8 мкм хорошо поглощается воздухом. Установки такого типа могут содержать несколько зон предварительного нагрева с расположением нагревателей с одной или с двух сторон конвейера. Увеличение количества зон позволяет увеличивать скорость конвейера. Ввиду комбинированного нагрева панельные нагреватели обеспечивают более равномерный нагрев плат, кроме того, средний и дальний ИК спектр не чувствителен к цвету нагреваемых объектов (при температуре ниже 600°C). Такие нагреватели также меньше чувствительны к загрузке зоны нагрева. Недостатками этих установок является их инерционность к изменению режимов и профиля зоны нагрева, так как каждая из панелей имеет неравномерное температурное поле по площади поверхности. В частности, панели с металлической лицевой частью имеют более низкую температуру по краям, в то время как панели с прозрачной для ИК излучений лицевой поверхностью, наоборот, имеют большую температуру.

Большую гибкость и возможность использования преимуществ лампового и панельного нагрева обеспечивают комбинированные системы (рис. 6.38). Установка состоит из корпуса, внутри которого располагаются панельные и ламповые ИК нагреватели, образующие необходимое количество зон нагрева. В первой и второй зонах осуществляется предварительный нагрев с помощью панельных нагревателей, обеспечивающих заданную температуру.

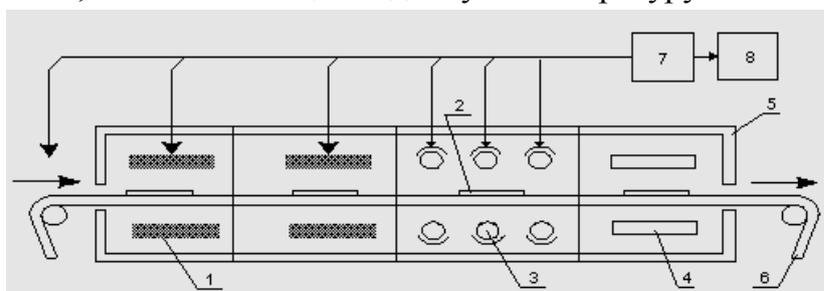


Рис. 6.38. Установка ИК нагрева комбинированного типа:

- 1 – панельные нагреватели; 2 – плата, 3 – ИК лампы, 4 – охлаждающее устройство, 5 – корпус, 6 – конвейер, 7 – микропроцессор, 8 – дисплей

Расплавление припойной пасты происходит в третьей зоне с помощью кварцевых ИК ламп, после чего изделие охлаждается в четвертой зоне. Печатные платы транспортируются через установку на ленточном (сетка из нержавеющей стали) конвейере. Установка снабжена встроенной микропроцессорной системой, с помощью которой выполняется программное управление режимами нагрева плат, контроль всех систем с отображением результатов на дисплее. В памяти компьютера может храниться библиотека типовых режимов оплавления для печатных плат различных типоразмеров.

Установки пайки «Радуга» применяют для оплавления припойных паст при сборке печатных узлов с применением поверхностно монтируемых изделий. Они позволяют осуществлять пайку как с одной стороны, так и одновременно с двух сторон печатной платы. Установка «Радуга-10» включает нагревательную камеру с регулируемой температурой плоских нагревателей, пульт управления, устройства регулирования температурного режима, задания временного интервала и измеритель температуры.

Конвейерная установка ИК пайки «Радуга-21» состоит из 5-ти зонной нагревательной камеры с регулируемой по зонам ИК нагревателей; конвейера с регулируемой скоростью для подачи плат с установленными элементами в нагревательную камеру; пульта управления; загрузочного и разгрузочного устройств; электрооборудования, системы регулирования температурного режима в нагревательной камере с помощью измерителя температуры регулирующего ТРМ-10. Установка имеет ширину конвейера 400 мм, длину нагревательной камеры 1100 мм, регулировку скорости конвейера от 0,015 до 2 м/мин, равномерность нагрева платы шириной 350 мм $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (рис. 6.39).



а



б

Рис. 6.39. Установки ИК пайки : «Радуга-10» (а) и «Радуга-21» (б)

Для электронных модулей с высокой плотностью компонентов применяют технологию двустороннего поверхностного монтажа, в которой припойную пасту через трафарет наносят на обе стороны печатной платы, установку элементов на припойную пасту ведут с дополнительной фиксацией на обратной стороне платы, после чего следует двусторонняя пайка в ИК печи. Результаты сравнения распределений дефектов микромодулей, изготовленных по двум технологиям, представлены в виде диаграммы Парето (рис. 6.40) [26]. Применение двустороннего поверхностного монтажа позволило существенно уменьшить число дефектов связанных с непропаем паяемых вручную элементов. Однако количество таких видов дефектов как: неисправность элемента, дефект платы осталось прежним, что можно объяснить особенностями температурно-временных режимов пайки на установке «Радуга-10»:

– высокая скорость предварительного нагрева приводит к возникновению перемычек припоя за растекания припойной пасты и замыканию чипов;

– высокая температура стадии стабилизации уменьшает активность флюса и, следовательно, ухудшает паяемость и приводит к разбрызгиванию шариков припоя на стадии пайки;

– большая продолжительность стадии оплавления приводит к значительным тепловым нагрузкам компонентов и вызывает их неисправность или платы;

– медленная скорость охлаждения снижает прочность паяных соединений.

Замыкание чипов так же может быть вызвано неточным их позиционированием на контактные площадки платы или смещением элементов при транспортировке по технологической линии. Для исключения смещения нужно использовать усовершенствованную внутрицеховую тару, а для точного позиционирования применять при установке элементов автоматы-укладчики.

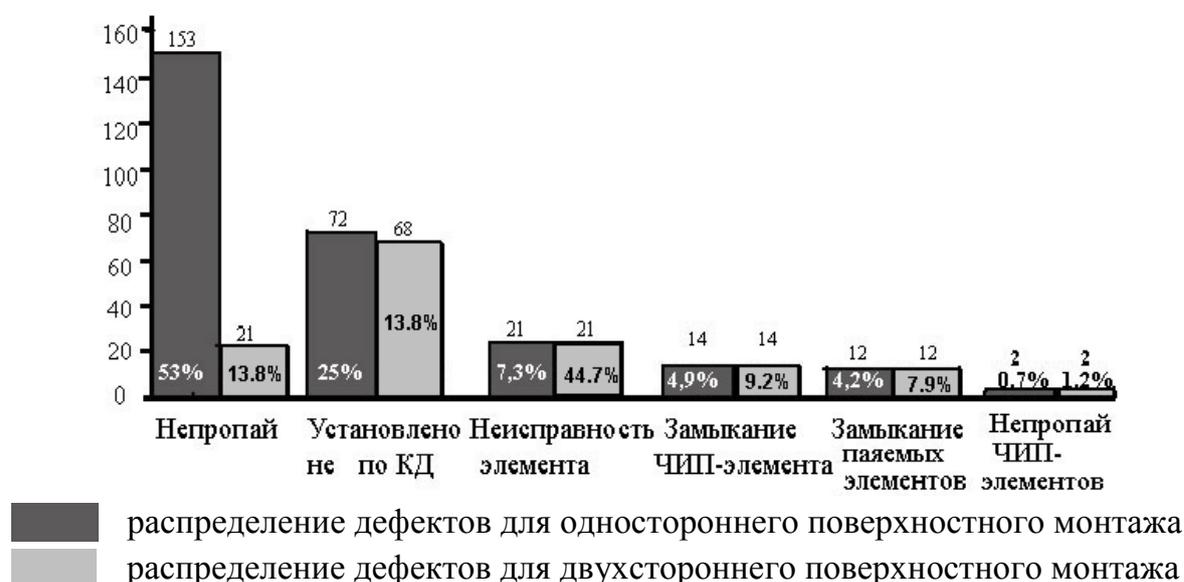


Рис. 6.40. Диаграмма Парето для дефектов поверхностного монтажа

Перспективен для монтажа радиоэлементов на печатные платы метод нагрева световым лучом дуговых ксеноновых ламп сверхвысокого давления. Эти источники света имеют спектр излучения с длинами волн 0,2–2,4 мкм. Такое излучение более эффективно для нагрева металлов, чем ИК излучение ламп накаливания и излучение лазера, так как коротковолновая часть спектра лучше поглощается металлом контактной площадки, припоем, выводами и покрытиями радиоэлементов и в меньшей мере поглощается диэлектрической основой.

Для процессов локального нагрева малую апертуру эллиптического рефлектора совмещают с большой апертурой системы в целом, что позволяет получить фокальное пятно малого диаметра (рис. 6.41). Оборудование для нагрева световым лучом менее энергоемко по сравнению с лазером, его энергетический КПД составляет 30–40 %, оно сравнительно просто по конструкции и удобно в эксплуатации [27]. Для фокусирования излучения источников света при пайке наиболее перспективны оптические системы на основе эллипсоидных отражателей. Оптическая система с излучателем ДКШ - 500 мощностью 500 Вт позволяет

расщепить пятно нагрева на два равных пятна с плотностью энергии в каждом 240 Вт/см^2 [28].

Расстояние между центрами пятен может изменяться от 0 до 35 мм в зависимости от типа радиоэлемента. На основе разработанной оптической системы создана установка для пайки радиоэлементов на печатные платы световым лучом дуговых ксеноновых ламп. Для диаметра вывода $0,6 \text{ мм}$ максимальная плотность лучистого потока 250 Вт/см^2 , время пайки $0,3\text{--}0,5 \text{ с}$. Печатная плата последовательно перемещается относительно источника с остановкой на время подачи импульса излучения. При автоматической пайке производительность составляет $50\text{--}60$ соединений/мин, при двусторонней пайке расщепленным лучом с максимальной плотностью лучистого потока в каждом пятне нагрева 200 Вт/см^2 производительность не менее 400 соединений/мин/

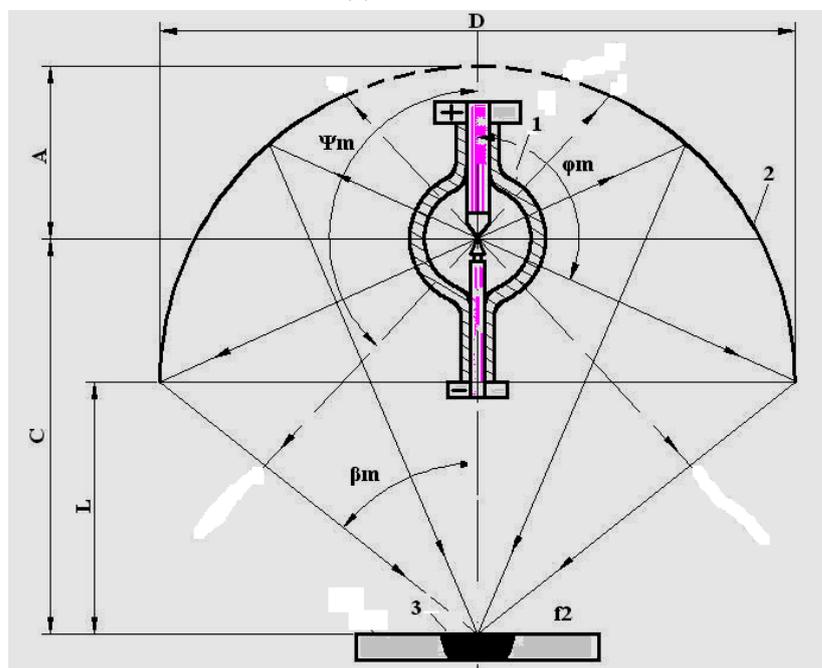


Рис. 6.41. Схема лучевого нагрева: 1– дуговая лампа, 2– отражатель, 3– зона нагрева

В зоне пайки лампа горит в рабочем режиме, а после прохождения ее - в дежурном. При этом термическое воздействие на основание печатной платы незначительно. Для пайки применяют припой ПОС 61, либо напессованный на все выводы с одной стороны микросхемы, либо в виде колец или полос перфорированного припоя, надеваемого на выводы.

6.6.3. Оптимизация температурных профилей инфракрасного нагрева

Режимы пайки плат определяются температурным профилем, который для паяльных паст на основе Sn оптимизирован для печей ИК нагрева (рис. 6.42).

Стадия предварительного нагрева снижает тепловой удар на электронные компоненты и печатные платы. В процессе предварительного нагрева происхо-

дит испарение растворителя из паяльной пасты при скорости роста температуры не более $1\text{--}3^\circ\text{C}/\text{с}$ [29]. Высокая скорость нагрева может приводить к преждевременному испарению растворителя, входящего в состав паяльной пасты, и к целому ряду дефектов: повреждение компонентов за счет теплового удара, разбрызгиванию шариков припоя и возникновению перемычек припоя. Разница температуры предварительного нагрева и температуры оплавления не должна превышать 100°C .

Стадия стабилизации активизирует флюсующую составляющую и удаляет избыток влаги из паяльной пасты. Повышение температуры на этой стадии происходит очень медленно для нагрева всех компонентов на плате до одинаковой температуры. На стадии активации флюса происходит удаление оксидной пленки с паяемых поверхностей. Время этого этапа составляет $60\text{--}120$ с. Если стадия стабилизации проводится недостаточное время, результатом могут быть дефекты типа “холодная пайка” и эффект “надгробного камня”. Скорость роста температуры не должна превышать $0,6^\circ\text{C}/\text{с}$.

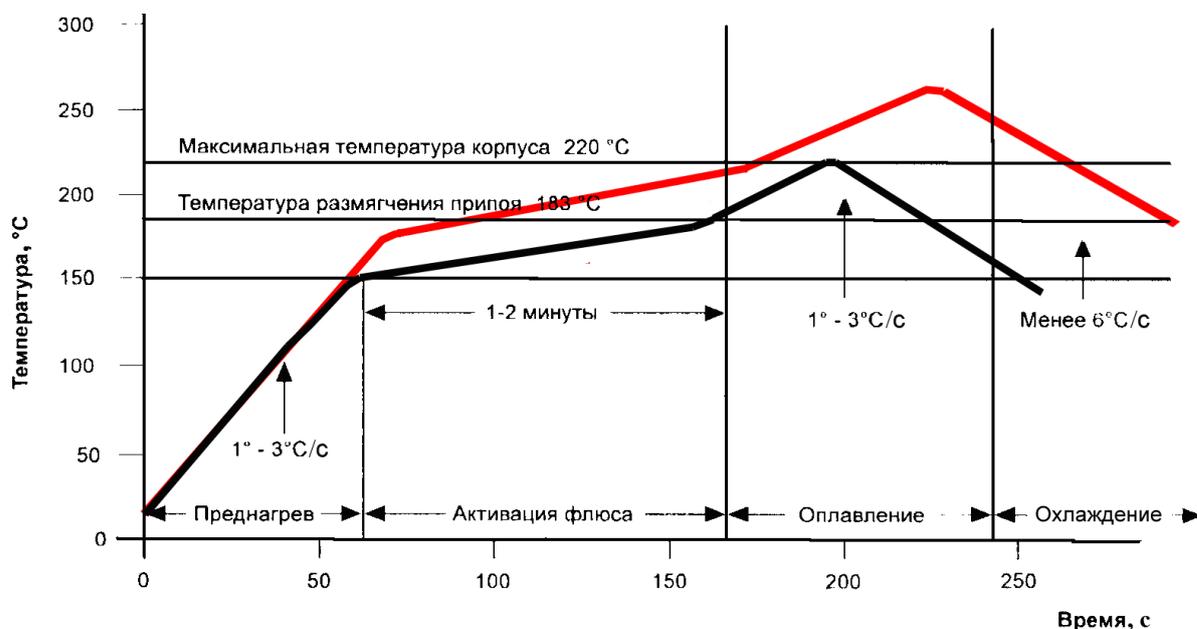


Рис. 6.42. Температурный профиль оплавления паяльных паст

На стадии оплавления температура повышается до расплавления паяльной пасты и происходит формирование паяного соединения. Для образования надежного паяного соединения максимальная температура пайки должна на $30\text{--}40^\circ\text{C}$ превышать точку плавления паяльной пасты и составлять $205\text{--}225^\circ\text{C}$. Для предотвращения таких дефектов как холодная пайка или перемычки припоя необходимо выдержать температуру корпусов электронных компонентов выше температуры расплавления припоя в течение $60\text{--}150$ с. На этапе пайки максимальная температура корпусов может держаться $10\text{--}30$ с. Скорость роста температуры от момента достижения платой температуры плавления припоя до максимальной температуры не должна превышать $1\text{--}3^\circ\text{C}/\text{с}$.

Быстрое охлаждение уменьшает образование интерметаллидных соединений, однако нельзя забывать о термических напряжениях, приводящих к повреждению компонентов при большой скорости охлаждения. Скорость охлаждения платы не должна превышать $6^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Окончательный выбор режимов производится исходя из конструкции печатной платы, типа и размеров компонентов, количества компонентов на плате, особенностей оборудования, результатов экспериментальных паяк, типа паяльной пасты.

Пайка поверхностно монтируемых электронных компонентов с использованием бессвинцовых паст требует применения малоинерционных ламповых ИК источников среднего диапазона излучения, а также более точного индивидуально-го температурного профиля нагрева каждого типоразмера платы с помощью микроконтроллера. Окончательный выбор режимов проводится технологом исходя из конструкции печатной платы, типа и размеров компонентов, их количества на плате, особенностей оборудования и типа паяльной пасты.

Наиболее часто для контроля температуры в зоне нагрева используют температурный датчик, представляющий собой термопару. Термопара в свою очередь подключается к цифровому устройству измерения температуры. На сегодняшний день ввиду увеличения сложности электронных модулей и увеличения плотности монтажа для контроля температуры в рабочей зоне пайки используют устройства термопрофилирования, которые способны нести в памяти множество различных профилей пайки, в том числе и для бессвинцовой технологии, а также производить запись термопрофиля текущего процесса с целью дальнейшей его оптимизации.

Примером такого устройства является MEGAM.OLE 20 (рис. 6.43), которое позволяет измерять температуру на протяжении длительного периода времени (12 часов), обладает низкой погрешностью измерения, способно производить измерения по 20 каналам, что позволяет охватывать информацию при пайке больших и сложных платах, получая её с большой точностью.



Рис. 6.43. Устройство для измерения температуры MEGAM.OLE 20

Так как термопары крепятся к плате контактным методом, то они могут повредить сами паяные соединения, и что бы этого не произошло, используют приборы бесконтактного контроля температуры: пирометры или тепловизоры. Так как контроль температуры требует затрат времени, то пирометр удобно установить на штативе над исследуемой платой (рис. 6.44), как рекомендует компания Optris (Германия). Прицеливание осуществляется с помощью двух лазерных лучей, которые точно укажут место измерения и покажут диаметр пятна измерения.



Рис. 6.44. Крепление пирометра Optris LS на штативе для обеспечения минимального пятна измерения

Современные тепловизоры позволяют получать тепловые изображения высокого разрешения и качества, которые необходимы при контроле малоразмерных объектов. Тепловизор PI компании Optris (рис. 6.45) имеет неохлаждаемую микроболометрическую матрицу 160×120 элементов, высокое температурное разрешение, что позволяет оценить по изображению перепад температур соседних области до десятой доли градуса [30].

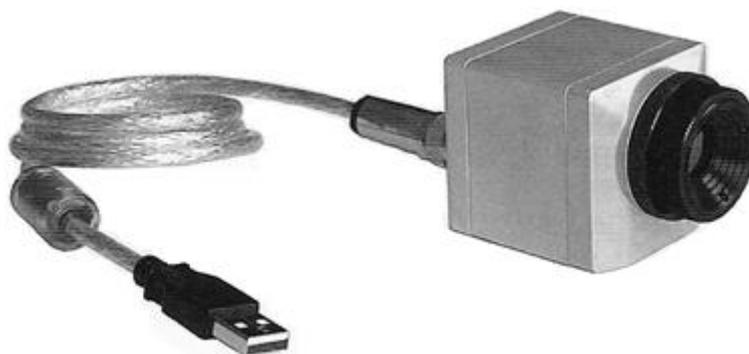


Рис. 6.45. Тепловизор Optris PI

С помощью пирометров и тепловизоров улучшается оптимизация измерения температуры, так как точность их очень высока, высокое время срабатывания, высокие температурные разрешения, а так же возможность их подключения к компьютеру, что сразу позволяет обработать полученную информацию, строить динамические температурные диаграммы и загрузить данные в такие приложения, как Microsoft Excel и др.

Для получения температурно-временных диаграмм в автоматическом режиме возможно применение измерителя-ПИД-регулятора ОВЕН ТРМ210, который предназначен для измерения и точного поддержания температуры, давления или других физических величин в различных технологических процессах и автоматизированного измерения параметров при подключении к персональному компьютеру. Подключение производится посредством встроенного интерфейса RS-485, однако необходимо преобразование интерфейсов из RS-485 в USB, что реализуется с использованием автоматического преобразователя интерфейсов USB/RS-485 ОВЕН АС4 [31].

ПИД-регулятор ОВЕН ТРМ210 обеспечивает регулирование мощности совместно с прибором ОВЕН БУСТ при использовании токового выхода 4–20 мА, имеет два выхода в любых комбинациях: электромагнитное реле, оптосимистор, оптотранзистор, «токовая петля»; унифицированное напряжение 0–10 В; сигнализацию об аварийной ситуации двух типов: выходе регулируемой величины за заданные пределы и об обрыве в цепи регулирования, а также автонастройку ПИД-регулятора по эффективному алгоритму. Структурная схема измерений температурного профиля нагрева приведена на рис. 6.46.

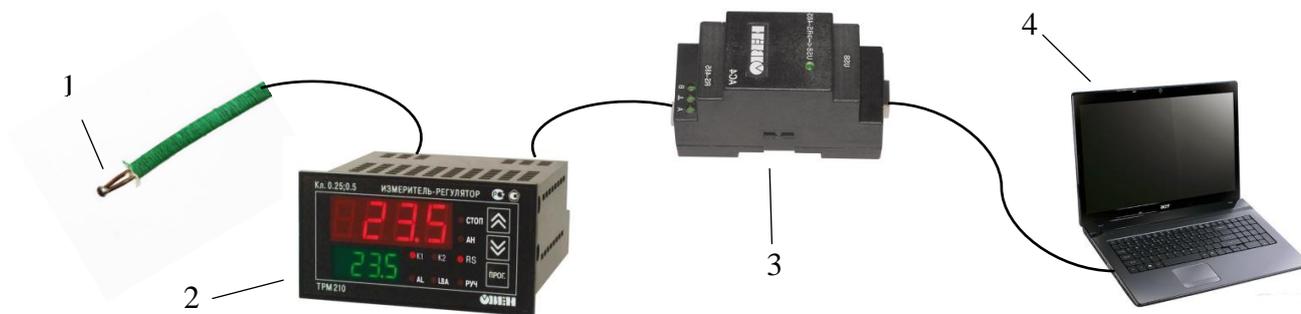


Рис. 6.46. Схема исследования температурно-временного профиля пайки: 1 – датчик температуры (термопара), 2 – измеритель-регулятор ТРМ210, 3 – преобразователь интерфейса АС4, 4 – персональный компьютер

ИК источники нагрева широко применяются при ремонте электронных модулей, как в единичном, так и серийном производстве. Их использование для монтажа и демонтажа многовыводных поверхностно монтируемых компонентов обусловлено возможностью высокой точности контроля температуры, в то время как для конвективных источников это проблематично. Процессы демонтажа требуют максимально точного контроля температуры в зоне нагрева, поскольку

стоимость электронных модулей достигает нескольких тысяч долларов, а зачастую стоимость многослойной платы может в несколько раз превышать стоимость демонтируемого электронного компонента. При длительном воздействии высокой температуры на печатную плату возможно её коробление, что приведёт к ухудшению её механических и прочностных характеристик, и как следствие ухудшению электрических параметров (волнового сопротивления, появление микротрещин в медных проводниках приводит к изменению их сопротивления).

Для моделирования процесса нагрева ИК излучением применен программный комплекс CosmosWorks (приложение программы SolidWorks), основанный на методе конечных элементов. Для ИК нагрева рассматривается только интегральное, т.е. суммарное по всем длинам волн, излучение. Излучающие тепло поверхности задаются абсолютно чёрным, абсолютно белым или идеально серым, так что, в соответствии с законом Ламберта, их излучение предполагается диффузным, т.е. с независимой от направления излучения яркостью. В соответствии с законом Стефана-Больцмана, излучаемое с единицы поверхности тепло определяется как:

$$Q = F_s \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot S_n (T_n^4 - T_s^4), \quad (6.42)$$

где: F_s – угловой коэффициент, ε – излучательная способность тела, σ – постоянная Стефана-Больцмана, S_n – площадь нагрева, T_n – температура нагревателя, T_s – температура нагреваемой поверхности.

Длина волны, при которой плотность потока излучения черного тела достигает максимального значения для данной температуры, может быть определена из закона Планка посредством выполнения условий максимума:

$$\frac{dE_\lambda}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left[\frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \right]_{T=const} = 0, \quad (6.43)$$

где E_λ – плотность потока монохроматического или спектрального излучения чёрного тела при температуре T , λ – длина волны, C_1 и C_2 – первая и вторая постоянные излучения.

Решение уравнения (6.43) дает формулу закона смещения Вина:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}, \quad (6.44)$$

где λ_{\max} – длина волны, при которой достигается максимум монохроматической плотности потока излучения чёрного тела с температурой T .

Граничными условиями являются значения интенсивности источника ИК излучения, параметры излучающих поверхностей (их материалы), контактные условия соприкосновения поверхностей, расстояние от источника нагрева до области нагрева, продолжительность времени нагрева. В результате моделирования нагрева ИК излучением микросхемы в корпусе BGA, установленной на печатной плате из стеклотекстолита FR-4 толщиной 1,5 мм получено распределение температуры на поверхности корпуса BGA и на обратной стороне печатной

платы (рис. 6.47). Максимальное температурное воздействие оказывается на поверхность корпуса микросхемы и прилегающую к ней область, при этом разница между температурой под микросхемой и на её поверхности составляет 50°C , что при нарушении режима пайки может привести к возникновению значительного градиента внутренних напряжений, в результате чего может произойти выход микросхемы из строя или нарушение структуры печатной платы [32].

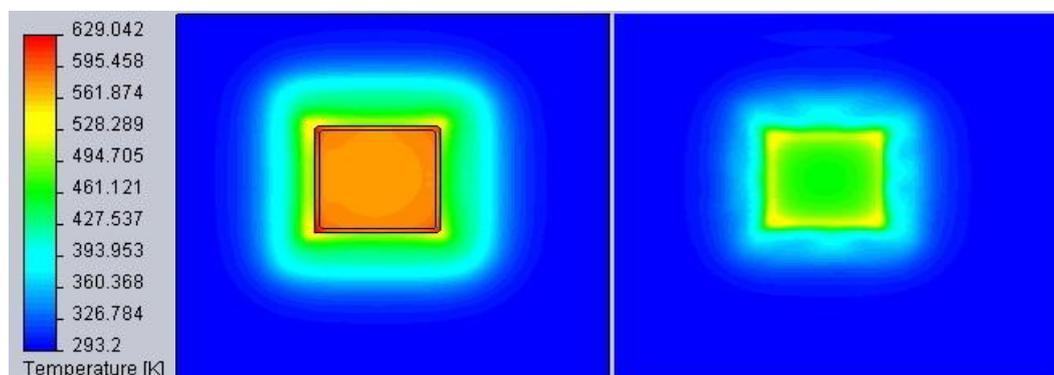


Рис. 6.47. Распределение поля температуры на поверхности BGA и платы

Максимальная разница между температурой на поверхности печатной платы и областью нагрева составляет 200°C , что приведёт в процессе монтажа или демонтажа к возникновению большого градиента напряжений и как результат деформации печатной платы (рис. 6.48).

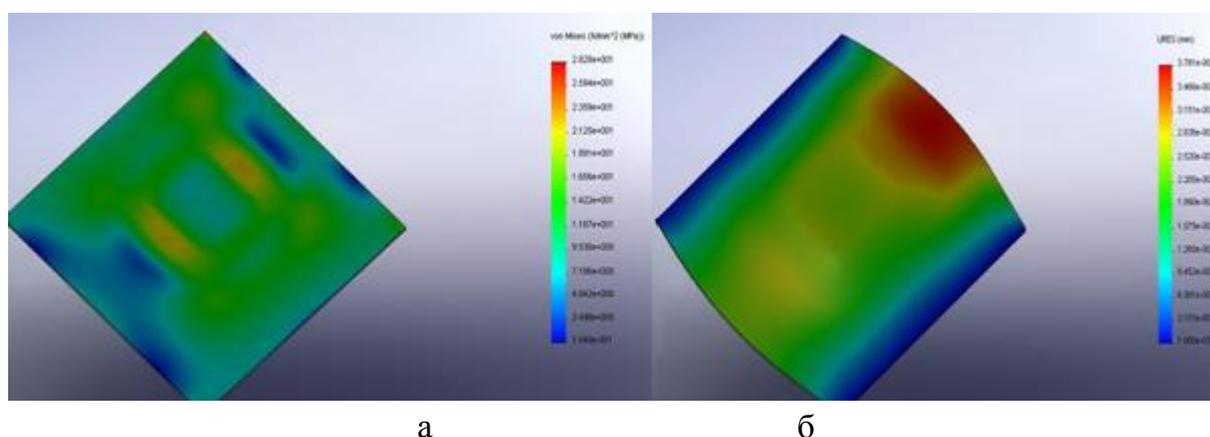


Рис. 6.48. Распределение напряжений в плате (а) и ее деформация (б)

В результате возникновения большой разности напряжений (15 – 30 МПа) происходит деформация печатной платы, при этом деформируется область не только вокруг микросхемы, но и под ней, что может привести к нарушению целостности электрических соединений или непропаю.

Для того чтобы уменьшить градиент напряжений и устранить деформацию печатной платы применяют двусторонний нагрев с помощью дополнительного нагревателя, который располагается под печатной платой. Температуру

нижнего нагревателя устанавливают равной половине температуры основного нагревателя. Анализ температурного поля в данном случае показывает, что температура корпуса микросхемы изменилась незначительно, однако под ней температура возросла на 130°C.

Таким образом, для поверхностного монтажа все большее применение получают ИК паяльные установки, которые благодаря своим функциональным возможностям способны эффективно выполнять монтаж и демонтаж компонентов в корпусах типа BGA, CSP, PGA, SOIC, QFP, PLCC .

6.7. Лазерная пайка

6.7.1. Твердотельные лазеры для монтажной пайки

Лазерное излучение используется для пайки планарных выводов ИС и радиоэлементов к контактными площадкам печатных плат, безвыводных "чиповых" элементов на платы в виду следующих преимуществ [33]:

- высокая локализация мощности в зоне нагрева (до 1000 МВт/м²);
- безинерционность воздействия излучения импульсами малой длительности 1–10 мс, что позволяет точно дозировать энергию;
- очень малая зона термического влияния (0,03–0,25 мм) при минимальном диаметре пятна нагрева 0,01 мм;
- не требуется вакуум, возможна работа в атмосфере любого состава;
- возможны соединения материалов с существенными различиями оптических, теплофизических и механических свойств;
- расфокусировка луча обеспечивает необходимую плотность энергии;
- автоматизация лазерных установок за счет применения микропроцессоров и транспортных систем.

Источником лазерного излучения являются оптические квантовые генераторы ОКГ, которые по агрегатному состоянию рабочего вещества подразделяются на газовые, жидкостные и на твердом теле. В зависимости от способов возбуждения рабочего вещества ОКГ работают с оптической или химической накачкой в непрерывном или импульсном режимах, а также в режиме синхронизации модуляции.

ОКГ на неодимовом стекле и рубине имеют высокую удельную мощность до 10000 МВт/м², однако их применение ограничено из-за низкой эффективности и ограниченной частоты следования импульсов ОКГ на алюмоиттриевом гранате (АИГ) с длиной волны 1,06 мкм обеспечивают также высокое значение удельной мощности до 1000 МВт/м², в сочетании с высокой частотой следования (до 20 Гц) вследствие низкого порога накачки и хорошей теплопроводности рабочего вещества. Газовый лазер на СО работает с еще большей эффективностью как в непрерывном, так и в импульсном режимах, однако длина волны 10,6 мкм хорошо отражается металлами.

Аллюмоиттриевый гранат - монокристаллический материал, выращиваемый с

ориентацией по кристаллографической оси $\langle 100 \rangle$. Он представляет соединение $Y_3 Al_5 O_{12}$ и отличается очень высокой теплопроводностью ($0,13 \text{ Вт/см}^2$), малым коэффициентом теплового расширения, высокой механической прочностью (175 МПа), а также малым порогом возбуждения. Для генерации излучения в состав АИГ введены активизирующие ионы трехвалентного неодима– элемента из группы лантанидов - в количестве $0,5-1,0\%$.

Мощность лазерного излучения 125 Вт в лазере достигается благодаря использованию 2-х активных элементов в излучателе. Коэффициент пропускания выходного зеркала (до 20%) является оптимальным и обеспечивает максимальную мощность лазерного излучения при номинальном токе через лампу накачки. Активный элемент и лампа накачки размещаются в непосредственной близости друг от друга и помещаются в отражатель, повышающий долю энергии светового излучения лампы, которая подается внутрь активного элемента (рис. 6.49).

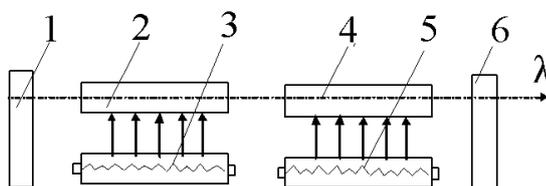


Рис. 6.49. Схема лазерного излучателя: 1 – глухое зеркало, 2, 4 – активные элементы, 3, 5 – лампа накачки, 6 – выходное зеркало

Основным элементом излучателя является квантрон, в состав которого входят активный элемент, отражатель, корпус, штуцера охлаждения, фланцы и втулки крепления. Отражатель представляет собой моноблок из легированного европием кварцевого стекла в форме эллиптического цилиндра с полированной боковой поверхностью, покрытой слоем серебра. На внешний слой серебра нанесено защитное покрытие из меди и никеля.

Кварцевое стекло отражателя с легирующими добавками не пропускает вредное для активного элемента ультрафиолетовое излучение лампы накачки, что позволяет использовать во внутреннем контуре системы охлаждения лазера дистиллированную воду без каких-либо фильтрующих добавок и тем самым значительно повышает эксплуатационные свойства лазера. Благодаря эллиптической форме отражателя распределение накачки по сечению активного элемента имеет максимум в центральной части, что увеличивает эффективность генерации излучения.

Активный элемент ГП $6,3 \times 100$ выполнен в виде круглого стержня диаметром $6,3 \text{ мм}$ и длиной 100 мм , изготовлен из монокристалла аллюмоиттриевого граната, активированного трехвалентными ионами неодима (АИГ). Резонатор излучателя образован 2-мя зеркалами с многослойными диэлектрическими отражающими покрытиями. Основу зеркал составляют подложки, имеющие вид шайб диаметром 40 мм , толщиной 4 мм , изготовленные из стекла КУ–1. Выходное зеркало имеет коэффициент пропускания $20 \pm 2\%$, а глухое - не менее $0,2\%$.

Изменение положения поверхности зеркала относительно оси лазерного излучения осуществляют путем поворота юстировочных винтов.

Система охлаждения лазера - жидкостная 2-х контурная с теплообменным устройством типа "вода-вода" с термостабилизацией охлаждающей жидкости, циркулирующей по замкнутому контуру при помощи жидкостного насоса УО-1. В качестве охлаждающей жидкости в лазере используется вода. Наряду с хорошими теплофизическими характеристиками, доступностью и безопасностью вода имеет высокие стабильные коэффициенты пропускания излучения, оптической накачки и способностью отфильтровывать инфракрасную часть спектра. Во внутреннем контуре используют только дистиллированную воду.

Средняя мощность излучения в импульсе определяется как:

$$P = \frac{E}{t}, \quad (6.46)$$

где E – энергия излучения; t – длительность импульса.

При непрерывном излучении лазера длительность воздействия равна:

$$t = \frac{d}{V}, \quad (6.47)$$

где d – диаметр луча; V – скорость сканирования платы относительно луча.

Тогда средняя мощность излучения равна:

$$P = \frac{EV}{d}, \quad (6.48)$$

а средняя плотность мощности излучения для луча круглой формы

$$E = \frac{1,27EV}{d^3}. \quad (6.49)$$

Для оценки мощности лазерного излучения используют измеритель средней мощности и энергии импульсов ОКГ ИМО-2 с погрешностью 10 % .

Лазерный луч вследствие уникальных технологических особенностей: узкая направленность, локальность теплового воздействия, высокая регулируемость является универсальным инструментом бесконтактной пайки безвыводных элементов на платы микросборок.

Энергетический баланс лазерного воздействия описывается уравнениями:

$$E_l = E_{\text{погл}} + E_{\text{отр}}, \quad E_{\text{погл}} = E_{\text{жс}} + E_m, \quad (1)$$

где E_l - энергия лазерного луча в зоне обработки, $E_{\text{погл}}$ - энергия, поглощенная в процессе фотоно-электронных соударений, $E_{\text{отр}}$ - энергия, отраженная от поверхности, $E_{\text{жс}}$ - полное теплосодержание расплавленного металла, E_m - энергия, отводимая теплопроводностью вглубь металла.

Интенсивность проникающего лазерного излучения убывает по экспоненциальному закону Бугера

$$I(x) = I_0 k \cdot e^{-\gamma \cdot x} \quad (2)$$

где x - глубина проникновения, I_0 - интенсивность лазерного излучения на поверхности, k - коэффициент поглощения, γ - степень поглощения.

Энергия поглощенного излучения E равна:

$$E = qS\tau, \quad (6.50)$$

где q – плотность мощности излучения, S – площадь облучения, τ – время.

Поток энергии, падая на плоскую поверхность, нагревает ее до температуры T_s [34]:

$$T_s = T_0 + \frac{2q(1-R)}{k} \left(\frac{\alpha t}{\pi} \right)^{1/2}, \quad (6.51)$$

где R – коэффициент отражения поверхности, k – коэффициент теплопроводности, α – коэффициент температуропроводности, t – время нагрева.

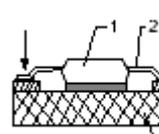
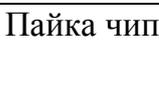
Уравнение справедливо до начала плавления, поскольку при плавлении поглощаемая энергия расходуется на скрытую температуру плавления. Ввиду нелинейности проникновения излучения задача вычисления границы продвижения расплава достаточно сложна. Время достижения температуры плавления $T_{пл}$ под действием лазерного излучения можно оценить как:

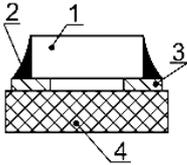
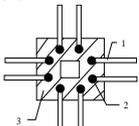
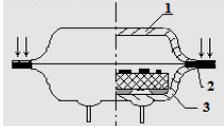
$$t_{пл} \approx \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\rho c T_{пл}}{Aq} \right)^2, \quad (6.52)$$

где ρ – плотность металла, c – удельная теплоемкость, A – коэффициент поглощения.

Технологические особенности пайки различных изделий лазерным излучением с длиной волны 1,06 мкм приведены в табл. 6.3. В отличие от ряда способов групповой пайки, при лазерной пайке, как правило, осуществляется раздельное формирование последовательности соединений.

Таблица 6.3 . Технологические особенности лазерной пайки

Эскиз соединения	Особенности	Режимы
 <p>Проводники</p>	Пайка проводника 3 к поверхности 4. Луч концентрируют на шарике припоя 2, нанесен флюс 1	<u>Непрерывный</u> Р = 50–60 Вт $\tau = 1-5$ с
 <p>Элементы с планарными выводами</p>	Выводы 2 элемента 1 закрепляют на контактных площадках 3 подложки 4. Припой в виде пасты. Луч направляют на вывод, который прижимают к подложке.	<u>Непрерывный</u> Р до 60 Вт $\tau =$ до 5 с
 <p>Пайка чипов</p>	Элемент 1 закрепляют на контактных площадках 3. Луч направляют на пасту 2 под углом к подложке 4	<u>Импульсный</u> Е = 2–4 Дж f = 10 Гц

	или разделяют на 2 потока и направляют на торцы элемента	$\tau = 10 \text{ мс}$
<p>«Паучок» к шариковым выводам</p> 	Ленточные выводы 1 покрыты припоем 2, на зону 3 формируют излучение в виде контура прямоугольной формы	<u>Импульсный</u> $E = 25\text{--}90 \text{ Дж}$ $\tau = 4 \text{ мс}$
<p>Герметизация корпуса</p> 	Корпус 3 с крышкой 1 сжимают с усилием до 3 Н. Лучи наводят на крышку в зоне нанесения припоя	<u>Импульсный</u> $E \text{ до } 30 \text{ Дж}$ $\tau = 7 \text{ мс}$ $d = 5 \text{ мм}$

Однако с учетом возможности автоматизации процессов контроля, а также ряда других факторов (более высокое качество пайки, расщепление луча и т. д.), общее время монтажа при лазерной управляемой пайке может быть сравнимо с групповой пайкой [35].

Максимальная плотность мощности лазерного воздействия ограничена процессами газовой выделением в зоне пайки, и при применении стандартных паяльных паст составляет 3–5 Вт/мм². Наиболее перспективной является лазерная управляемая пайка с системой контроля хода процесса (рис. 6.50) [36].

ИАГ лазер 1 с внутрирезонаторным акустооптическим затвором 2 формирует импульс излучения. С помощью поворотного зеркала 3 и объектива 4 энергия излучения передается поверхности изделия 5, которое в ограниченной зоне нагревается до определенной температуры. Во время процесса нагрева-охлаждения ИК излучение от анализируемого участка линзой 6 передается на охлаждаемый приемник 7. Амплитуда и форма ИК сигнала анализируется по заданной программе компьютером 8.

Компьютер через блок управления 9 задает перемещение двух координатного стола 10 с изделием по заданным координатам. He–Ne лазер 11 применен для визуализации объекта воздействия. Для контроля качества соединений служит телекамера системы технического зрения 12.

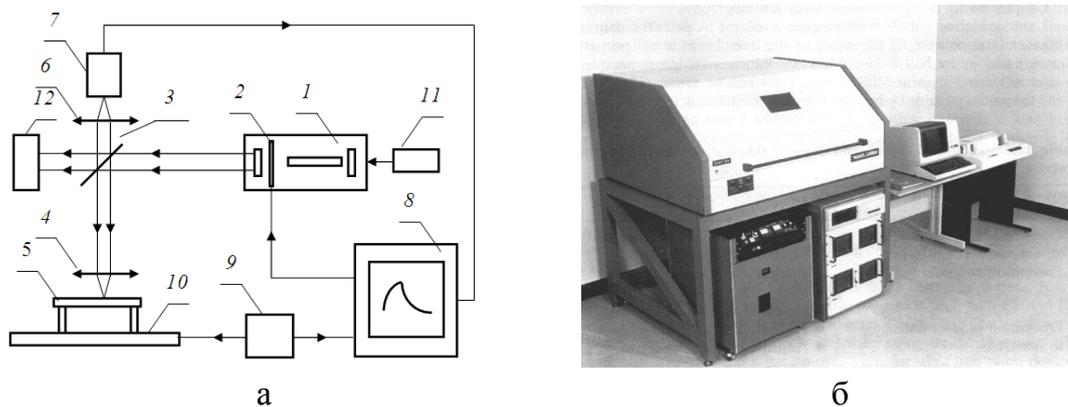


Рис. 6.50. Схема (а) и внешний вид установки (б) лазерной управляемой пайки

Процесс пайки включает: нанесение через трафарет паяльной пасты и клея, установку компонентов, автоматизированную пайку выводов, снятие временных характеристик теплового излучения паяных соединений и контроль по ним процесса во времени. При пайке компонентов монтажа, на которые накладываются жесткие температурные условия, ИК датчик следит за уровнем сигнала (температурой нагреваемого паяного соединения) и при достижении заданного значения отключает лазерный луч. Оценка качества пайки может осуществляться сравнением измеренных характеристик ИК сигнала с заданными характеристиками эталонных паек. Время отдельного измерения определяется типом компонента и лежит в интервале 50–100 мс.

Дозирование паяльной пасты оказывает влияние на длительность лазерного нагрева необходимого для пайки. Качественное выполнение лазерной пайки, в условии разброса дозирования массы припоя, возникающего в реальном производстве, требует учета данного фактора. Одним из путей решения данной проблемы является использование автоматического отключения лазерного воздействия через обратные связи во время пайки.

Оптимальная длительность лазерного воздействия для пайки чип-конденсаторов зависит от их размеров, массы и высоты галтели паяного соединения (табл. 6.4).

Таблица 6.4. Параметры лазерной пайки чипов разных размеров

Параметры			
Размеры чип-конденсатора, мм	4×2,5×1	6×4×1,5	8,5×6×1
Масса чипа, мг	55	195	275
Размер контактной площадки, мм	1,5×4,5	1,8×6	2,3×8
Масса паяного соединения, мг	15	23	38
Высота галтели соединения, мм	0,4–0,6	0,4–0,6	0,4–0,6
Размер пятна воздействия, мм	3×2	4,5×2	4,5×2
Мощность излучения, Вт	20	30	30
Длительность лазерной пайки, мс	120	250	310

Исследован процесс пайки микромодулей с помощью лазера на алюмоиттриевом гранате с неодимом с длиной волны 1,06 мкм, длительностью импульсов 0,1 с и частотой следования 1–50 Гц. Для накачки активного элемента применена ИК лампа мощностью 2 кВт. Энергия импульса лазерного излучения составляла 0,75 Дж при напряжении на лампе ОКГ 900 В и частоте импульсов 3 Гц, а средняя мощность излучения в импульсе – 3,75 кВт [37].

При средней мощности излучения в импульсе 3,75 кВт и энергии излучения до 2 Дж температура 300°C в зоне взаимодействия при диаметре пятна излучения 3 мм и частоте импульсов 10 Гц достигнута за 1–2 с. Зависимости температуры нагрева от времени облучения и частоты импульсов при различных рабочих частотах ОКГ и напряжении питания ИК лампы накачки 700 В представлены на рис. 6.51, а, от диаметра луча - на рис. 6.51, б.

Скорость нарастания температуры на начальном участке пропорциональна частоте импульсов излучения, однако с увеличением времени облучения она уменьшается до 5 °C/с. Температура нагрева нелинейно растет с уменьшением диаметра луча в зоне пайки и с увеличением частоты импульсов, что может привести к перегреву, испарению припоя и повреждению изделий.

Таким образом, для сборки электронных микромодулей с плотным поверхностным монтажом все большее применение получают лазерные технологические установки, способные эффективно выполнять монтаж и демонтаж различных компонентов (рис. 6.52), в том числе в корпусах типа BGA, CSP, PGA, SOIC, QFP, PLCC.

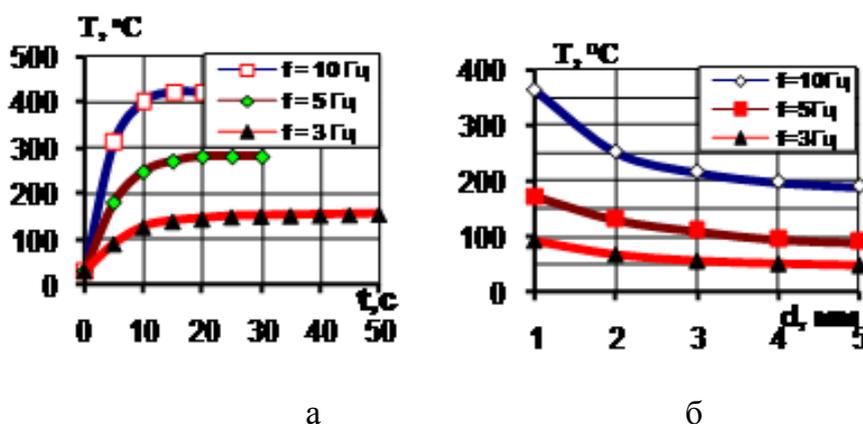


Рис. 6.51. Зависимости температуры зоны пайки от времени облучения (а), диаметра луча (б) и частоты импульсов

Преимущества лазерного излучения, по сравнению с инфракрасным, заключаются в высокой локализации мощности в зоне нагрева, безинерционности воздействия, что позволяет вести нагрев импульсами малой длительности и точно дозировать энергию излучения; малой зоне термического влияния (0,2–2,0 мм) [38].

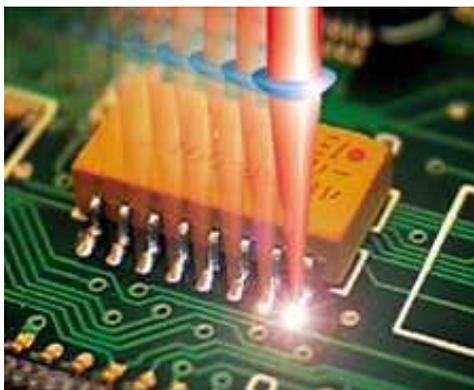


Рис. 6.52. Лазерная пайка выводов ИС

Оптимизация параметров импульсного лазерного излучения позволяет вести прецизионную скоростную пайку планарных выводов ИС и многовыводных МаБИС к контактными площадкам печатных плат, безвыводных "чиповых" элементов на платы модулей с высоким качеством, автоматизировать процесс, что наиболее полно отвечает требованиям технологии поверхностного монтажа.

К недостаткам лазерного излучения следует отнести:

- сложность технологического оборудования;
- нестабильность лазерного излучения во времени;
- особые требования техники безопасности;
- лазерное излучение в большей степени отражается металлом контактной площадки, покрытием выводов радиоэлементов, но в значительной мере поглощается диэлектрической основой печатной платы, вследствие чего может произойти его термическая деструкция;
- большая энергоемкость, малый КПД (около 1 %);
- необходимость точного совмещения плоскости печатной платы с фокальной плоскостью лазера.

6.7.2. Лазерные диодные системы для пайки

В настоящее время все большую эффективность приобретают гибкие и компактные лазеры с оптимальной для конкретного применения геометрией пучка и распределением интенсивности излучения. Новое поколение мощных диодных лазеров (ДЛ) открывает новые области их применения в обработке материалов. Микрооптическое формирование пучка позволило создать компактные сверхъяркие ДЛ с высоким КПД, простым обслуживанием и широким диапазоном применения.

Мощные компактные ДЛ имеют высокую надежность. Так, непрерывные ДЛ мощностью до 1 кВт с вводом излучения в волокно с диаметром сердцевины 200–600 мкм, широко используются для пайки в электронной и автомобильной промышленности (рис. 6.53). Высокая мощность волоконного лазера основана

на принципе увеличения силы лазерного пучка при помощи активированного оптического волокна. Источником излучения является полупроводниковый диод. Это новая технологическая платформа с огромным энергетическим потенциалом. Эти лазеры легко интегрируемы в промышленных процессах благодаря компактности, низком энергопотреблении, простоте и высокой надежности.

Широкое внедрение ДЛ в промышленные установки требует простых интерфейсов и систем индивидуального формирования пучка. Масштабируемые по мощности сверхъяркие ДЛ с вводом излучения в волокно, а также мощные лазеры со свободным излучением открывают новые перспективы применения лазерных технологий.



Рис. 6.53. Схема волоконного лазера с диодной накачкой

Для пользователя решающие параметры – скорость и безопасность. Один интегрированный лазерный инструмент не только создает излучение, но и индивидуально формирует лазерный пучок в месте его применения. Для индивидуального формирования пучка используется микрооптика и требуется высококачественное гомогенное распределение лазерного излучения по обрабатываемой поверхности. Реализация такого распределения осуществляется с помощью гомогенизирующих модулей, производимых в виде микрооптических решеток. Это позволяет снизить уровень негомогенности одного процента при мощности излучения в несколько киловатт.

На базе новых сверхъярких ДЛ созданы системы ДЛ с таким, как у обычных лазерных (CO_2 - или Nd: YAG-лазеры) систем, качеством пучка при сохранении таких преимуществ, как малые размеры, прочность и гибкость ДЛ. Так, ДЛ свободного излучения с длиной волны 808–980 нм и мощностью 50 Вт позволяет получить качество пучка 5 мм·мрад. Так, качество пучка (BPP – beam parameter product) мощных новейших ДЛ достигает 5 мм·мрад, что лежит в области традиционных лазерных источников излучения, таких как CO_2 - или Nd: YAG-лазеров (рис. 6.53). В волокно диаметром сердцевины 50 мкм можно вве-

сти до 50 Вт. Достигаемая плотность мощности открывает новые возможности применений, недоступные ранее для ДЛ [39].

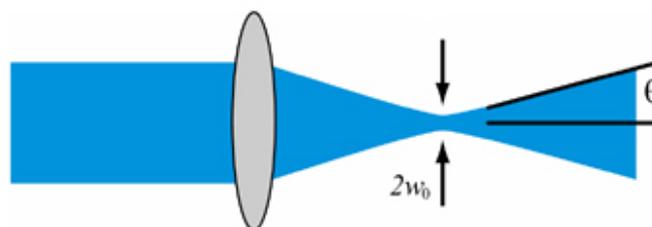


Рис. 6.54. Определение ВРР (произведение диаметра пучка в перетяжке ($2w_0$) на половину угла расходимости (θ))

КПД модулей ДЛ (отношение подводимой электрической мощности к оптической мощности, выходящей из волокна) превысил 30%. Эта величина достигается оптимизированным формированием пучка с помощью микрооптики, адаптированной к параметрам излучения новых диодных линеек. Эффективность ввода излучения в волокно находится в пределах 85–92% (для волокон без просветляющего покрытия). На рис. 6.55 представлен лазерный диод с выходом в волокно, работающий на длине волны 808 нм в диапазоне мощности: 2–7 Вт.

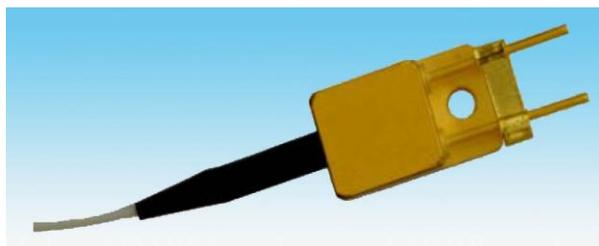


Рис. 6.55. Лазерный диод с выходом в волокно

Для пайки SMD используются лазерные диоды (излучатель), гомогенизатор (смеситель) и пучки световодов (линии передачи и фокусирующие устройства). От каждого лазерного диода отходит световод, которые затем собираются в пучок, формируется суммарный лазерный луч мощностью 4–8 Вт. Длительность облучения 0, 75–1,25 с. Один лазерный диод дает мощность 0, 5–1,0 Вт. Мощные лазерные диоды (более 30 Вт) монтируют на радиаторы, охлаждаемые водой. Группируя излучение отдельных диодов в виде лазерной сборки, можно получить технологический источник лазерного излучения мощностью от сотн до тысячи Вт (рис. 6.56).

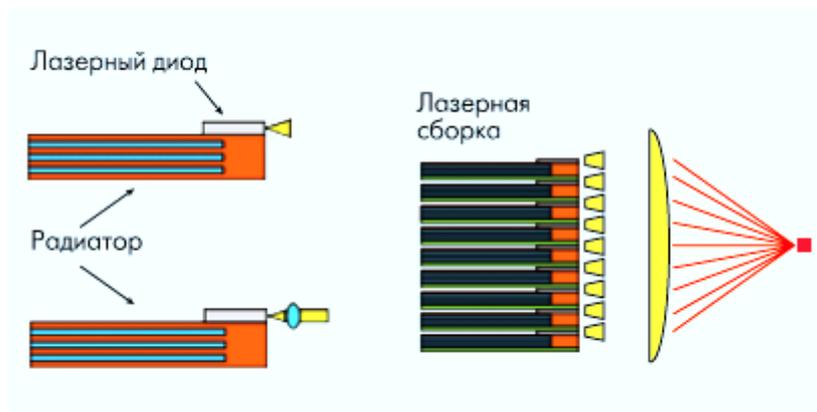


Рис. 6.56. Лазерная сборка

Важным преимуществом пайки диодным лазером является его способность фокусировать энергию луча только на рабочем участке при минимальном нагреве близлежащих компонентов. Луч имеет малую зону термического влияния, что приводит к меньшему нагреву платы. Пайка диодным лазером предназначена для использования в тех случаях, когда теплочувствительные компоненты находятся вблизи места пайки. Результатом быстрого нагрева и охлаждения припоя является мелкозернистая микроструктура припоя с улучшенными механическими свойствами контактных соединений [40].

В автоматизированных установках локальной пайки диодный лазер и дуговая нагревательная лампа Хеон интегрированы в роботизированное устройство. Использовались диодные лазеры мощностью 25 Вт и стандартный волоконно-матричный модуль, состоящий из 19 лазерных диодов, излучающих на длине волны 980 нм, и двух линз: коллимирующей и фокусирующей, которые создавали зону нагрева на расстоянии 33 мм от фокусирующей линзы. В видеоуправляемой лазерной паяльной станции лазер был соединен с осью Z декартовой роботизированной системы, в которую была интегрирована микрокамера. На фокусном расстоянии 33 мм луч лазера собирался в точке диаметром 0,8 мм на поверхности печатной платы. Сравнительная характеристика лазерных технологических систем приведена в табл. 6.5.

Таблица 6.5. Характеристика лазерных технологических систем

Параметр	CO ₂ - лазеры	YAG:Nd с ламповой накачкой	YAG:Nd с диодной накачкой	Диодные лазеры	Волоконные лазеры
Выходная мощность, кВт	1–30	1–5	1–4	1–4	1–3
Длина волны, мкм	10,6	1,064	1,064	0,80...0,98	1,07
ВРР, мм•мрад	3–6	22	22	>200	1,3...14
КПД, %	8–10	2...3	4...6	25...30	20...25

Дальность доставки излучения волоконном, м	–	20–40	20–40	10–50	10–300
Стабильность выходной мощности	Низкая	Низкая	Низкая	Высокая	Очень высокая
Чувствительность к обратному отражению	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая	Низкая
Занимаемая площадь, м ²	10–20	11	9	4	0,5
Стоимость обслуживания, отн. ед.	1,0–1,5	1	4–12	4–10	0,1
Периодичность замены ламп или лазерных диодов, ч	-	300–500	2000–5000	2000–5000	>50000

Скорость пайки диодного лазера превосходила скорость дуговой нагревательной лампы в 2 раза. Диодный лазер (на 810 нм) может эффективно проникать в припой, уменьшая время необходимое для создания хорошего соединения. Системы пайки диодным лазером могут быть полезны в смешанных областях производства, где имеется потребность в оловянно-свинцовой и бессвинцовой пайке.

Список литературы к главе 6

1. Ланин В.Л., Достанко А.П., Телеш Е.В. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники. Минск: Издательский Центр БГУ, 2007.–574 с.
2. Wassink K.R.J. Soldering in Electronics. Ayr, Electrochem. Public, 2002.
3. Автоматизация и механизация сборки и монтажа узлов на печатных платах / А.В. Егунов [и др.]; под ред. В.Г. Журавского. – М.: Радио и связь, 1988.– 280 с.
4. Ланин В.Л., Парковский В.В. Монтаж и демонтаж электронных компонентов Парковский // Компоненты и технологии. – 2009. – № 2. – С. 54–59.
5. Филор У., Цабель К. Надежность процесса для бессвинцовой технологии // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 4. – С. 56–58.
6. Борисенков С., Дятлов К. Пайка в паровой фазе (конденсационная): настоящее и будущее электронной промышленности // Технологии в электронной промышленности. – 201. – № 4. –С. 32–35.
7. Вологдин В.В., Куц Э.В., Асамов В.В. Индукционная пайка – Л.: Машиностроение, 1989. –72 с.
8. Простяков А.А. Индукционные нагревательные установки. – М.: Энергия, 1970. – 120с.
9. Рикетс Л.У., Бриджес Д.Э., Майллета Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты. – М.: Атомиздат, 1979. – 328 с.
10. Ланин В.Л., Тявловский М.Д. Особенности высокочастотного нагрева при герметизации пайкой корпусов БИС // Электронная техника Сер. 7 ТПО. – 1980.– Вып. 3 (100). – С. 11–14.

11. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
12. Ланин В.Л. Высокочастотный электромагнитный нагрев для пайки электронных устройств // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 5. – С. 46–49.
13. Шапошников О.А., Курдин Ю.А. Высокотемпературная индукционная пайка в электровакуумном приборостроении. – М.: ЦНИИ «Электроника». – 1982. – 40 с.
14. Induction Heating. Industrial Applications / Ed. by S. Lupi. – Paris, U.I.E., 1992. – 142 p.
15. Опыт высокочастотной пайки контактных узлов электроаппаратов/ П.Е. Базырин, В.В. Вологдин, Э.В. Куш и др. // Труды ВНИИТВЧ. – 1975. – Вып.15. – С.109–114.
16. Peter H. J. Wirtschaftliches HF Induktionsloten von Hydraulikrohren mit Schutzgasklappinduktoren // Scweibtechnik. –1983.– № 4.– S. 166–168.
17. Ланин В. Л. Бесконтактные вибрации в процессах высокочастотного электромагнитного нагрева // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – № 3. – С. 43–45.
18. Eddy current induced heating for the soldering reflow of area array packages / M. Li, H. Xu, S-W. R. Lee, J. Kim, D. Kim // IEEE Trans. on Advanced Packaging. – 2008. – № 2(31). – P. 399–403.
19. Ланин В.Л. Согласование высокочастотных генераторов с нагрузкой // Технологии в электронной промышленности. – 2012. – № 6. – С. 22–24.
20. Induction Soldering with HIG inside // www.item.com/solderingbrochure.pdf.
21. Ланин В. Л., Сергачев И.И. Высокоэффективные индукционные устройства для монтажной пайки в электронике // Технологии в электронной промышленности. 2012. №1. С. 26 – 29.
22. Колесов Д. Идеальный паяльник // Технологии в электронной промышленности. –2007.– № 6.– С. 32–34.
23. Ланин В.Л., Шнейдеров Е. Индукционные паяльники для монтажа электронных компонентов // Технологии в электронной промышленности. – 2009. № 5.– С. 40–43.
24. Зворыкин Д.Б. Отражательные печи инфракрасного нагрева. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
25. Зворыкин Д.В., Прохоров Ю.Н. Применение лучистого инфракрасного нагрева в электронной промышленности. – М.: Энергия, 1980. – 176 с.
26. Ланин В.Л., Хилькевич А.Н. Двусторонний поверхностный монтаж электронных модулей // Известия Белорусской инженерной академии. – 2003. – № 1(15)/4. – С.145–147.
27. Никифоров Г.Д., Федоров С.А., Овчинников В.В. Перспективы эффективного использования светового луча для сварки и пайки // Сварочное производство. – 1982. – № 8. – С. 15–17.
28. Коробко Н.А., Опарин М.И., Пронин Н.С. Поверхностный монтаж радиоэлементов на печатные платы световым лучом ксеноновых ламп // Приборы и системы управления. –1991.– № 8.– С. 41– 42.

29. Ланин В.Л. Инфракрасный нагрев в технологии пайки поверхностного монтажа // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 3. – С. 38–42.
30. Котова С. Применение ИК измерителей температуры для контроля малоразмерных объектов // Технология электронной промышленности. – 2010. – № 1. – С. 45 – 47.
31. Ланин В. Л., Сергачев И. И. Температурно-временные профили пайки электронных модулей // Технологии в электронной промышленности. – 2012. – № 7. – С. 34 – 38.
32. Ланин В.Л., Парковский В.В. Оптимизация инфракрасного нагрева при монтаже многовыводных μ BGA микросхем на многослойные печатные платы // Технологии в электронной промышленности, 2012.– № 2. – С. 24–28.
33. Самаркин Ю.Д., Сурменко Л.А. Лазерная пайка в производстве изделий электронной техники. – М.: ЦНИИ Электроника, 1986. – 68 с.
34. Веденов А.А., Глащун Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов.– М.: Энергия, 1985.– 225 с.
35. Ланин В.Л. Лазерная управляемая пайка для монтажа электронных модулей // Технологии в электронной промышленности. – 2010. – № 2.– С. 22–27.
36. Хлопков Ю.В., Каменков В.С., Сафронов А.Н. Позиционная лазерная пайка // Электронная промышленность.– 1992.– №5.– С. 25–26.
37. Ланин В.Л. Лазерная пайка при сборке электронных модулей // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 6.– С. 40–44.
38. Ланин В.Л. Эффективность нагрева концентрированными потоками энергии при пайке в электронике // Электронная обработка материалов. – 2002. – № 2. – С. 17– 20.
39. Брунс П., Кубаки Ф. Мощные диодные лазеры – новые возможности для применения // Фотоника.– 2008.– № 5.– С. 6–12.
40. Голдберг Г. Пайка диодным лазером: следующее поколение бесконтактной пайки/ // Электронные компоненты. – 2004.– № 11. – С. 43–45.

ГЛАВА 7

ТЕХНОЛОГИИ МОНТАЖНОЙ ПАЙКИ СОЕДИНЕНИЙ

7.1. Пайка с помощью паяльников и паяльных станций

Для формирования монтажных соединений в мелкосерийном многономенклатурном производстве широко применяют различные конструкции паяльников и паяльных станций. В паяльнике перенос тепла осуществляется за счет теплопроводности жала, которое служит аккумулятором тепла, выделяемого нагревателем.

лем. В установившемся режиме количество теплоты, накопленное в медном стержне, зависит от мощности нагревателя.

Стабилизируют температуру жала паяльника различными способами:

- тиристорными терморегуляторами, состоящими из датчика температуры, закрепляемого в паяльном жале на расстоянии 30–40 мм от рабочего торца и схемы управления. Точность регулирования температуры на спае термопары достигает $\pm 2^{\circ}\text{C}$, однако на рабочем торце жала она составляет $\pm 5^{\circ}\text{C}$ за счет инерционности теплового поля (прибор "Термит");

- нагревателем с переменным электросопротивлением, зависящим от температуры. Например, в монтажном паяльнике фирмы Philips нагревательный элемент состоит из агломерата свинца и бария, сопротивление которого возрастает в сотни раз при нагревании выше точки Кюри, в результате чего сила тока снижается и паяльник остывает, а после охлаждения ниже точки Кюри процесс развивается в обратном порядке;

- использованием магнитного элемента (рис. 7.1), изменяющего свои свойства при нагреве выше точки Кюри, в результате чего в паяльнике фирмы Weller (США) происходит отключение нагревателя;

- применением массивного паяльного жала и близким расположением нагревателя.

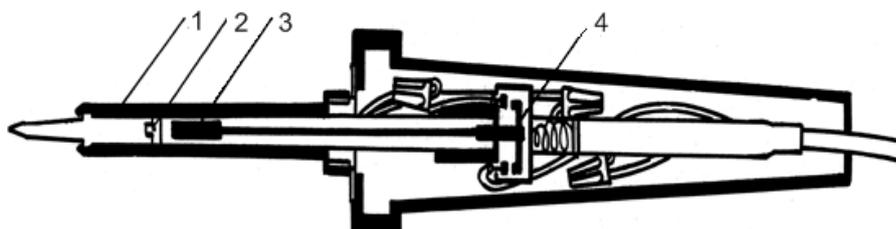


Рис. 7.1. Паяльник фирмы Weller с термостабилизацией: 1 – нагреватель, 2 – датчик температуры, 3 – постоянный магнит, 4 – выключатель

Паяльные жала характеризуются следующими геометрическими параметрами: длиной, диаметром, формой загиба жала и формой заточки рабочего конца. Длина жала зависит от пространственного расположения соединений и может быть от 10 (микропаяльники) до 300 мм (паяльники для объемного монтажа). Диаметр жала должен в 5–15 раз превышать диаметр проводника. Для паяльников установлен ряд предпочтительных диаметров: 0,5; 0,8; 1,5; 3; 5; 8; 10 мм [1].

Форма загиба жала выбирается в зависимости от глубины монтажа и интенсивности тепловой нагрузки, а также пространственного расположения паяемых соединений (табл. 7.1, рис. 7.2). Форма заточки паяльного жала зависит от плотности монтажа, размеров контактных площадок, интенсивности тепловой нагрузки (рис. 7.3, табл. 7.2).

Таблица 7.1. Унифицированный ряд загиба паяльных жал

Индекс жала	Угол загиба, град.	Характеристика применения		
		глубина монтажа	интенсивность нагрузки	расположение соединений
А	0	большая	любая	Разнотипное
Б	90	средняя	средняя	Однотипное
В	120	небольшая	средняя	Многообразие пространственного положения
Г	135	небольшая	высокая	

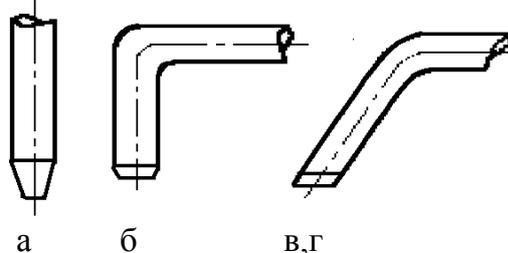


Рис. 7.2. Формы загиба паяльных жал

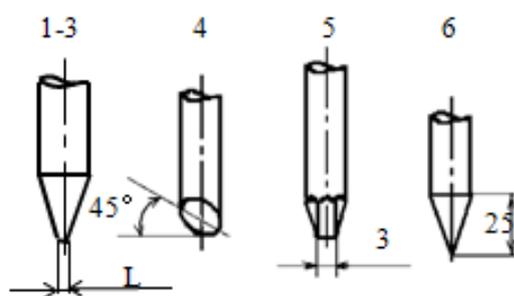


Рис. 7.3. Формы заточки унифицированного ряда паяльных жал

При унификации паяльных жал введены следующие их обозначения из трех знаков: первый определяет диаметр жала, второй (буква) - угол загиба жала, последний (цифра) - номер заточки, например, 8Б6 и т.д.

Эрозионная стойкость жала паяльника определяет его долговечность. Обычное медное жало из-за интенсивного растворения в припое после 1000 паяк теряет форму и нуждается в заточке. Для защиты жала применяют гальваническое никелирование толщиной 90–100 мкм, что удлинит срок службы жала примерно вдвое. Перспективное решение проблемы - применение порошковых спеченных сплавов медь-вольфрам. Повышенная термо- и износостойкость вольфрама удачно сочетается с хорошей теплопроводностью меди, а пористость материала улучшает смачивание жала припоем.

Таблица 7.2. Унифицированный ряд заточки паяльных жал

Номер заточки	Конфигурация жала	L, мм	Характеристика применения		
			плотность монтажа	размер контактных площадок	Интенсивность тепловой нагрузки
1	Две рабочие плоскости	2	высокая	небольшой	небольшая

2	- “ -	4	высокая	средний	средняя
3	- “ -	6	средняя	большой	высокая
4	Одна рабочая плоскость	5	высокая	средний	средняя
5	Три рабочие плоскости	3	средняя	средний	средняя
6	Увеличенная поверхность	до 1	высокая	небольшой	средняя

Беспроводной паяльник WC100 Weller для ремонтно-монтажных работ имеет встроенную подсветку зоны пайки, три сменных жала с диаметрами 0,8, 1,5, 2,5 мм и длиной 63 мм; время нагрева жала до температуры 270°C – 6 с; время работы от кадмиевой батарейки около 10 часов.

Зарубежные фирмы выпускают различные модификации паяльных станций, состоящих из стабилизированного блока питания, паяльника с набором сменных жал и вакуумного отсоса припоя из зоны пайки. Фирма Weller производит паяльные станции, начиная от недорогих типа WESD51D (рис. 7.4, а) мощностью 50 Вт и поддерживающих температуру паяльника в диапазоне от 240 до 750°C с точностью 5°C и до сложных паяльно-ремонтных центров с большим набором инструментов. Для ремонтных работ применяют паяльники без шнура, работающие от аккумуляторов (рис. 7.4, б).



Рис. 7.4. Паяльная станция (а) и работа с паяльником без шнура (б)

Станция АЛЬФА-100 компании Термоприбор (рис. 7.5) комплектуется 100-ваттным паяльником α -100, способным за несколько секунд распаять массивный контакт, на плате электронного устройства. При высокой мощности паяльник компактен и изящен, чему способствует его конструкция, в которой наконечник плотно прижат боковой поверхностью к нагревателю по всей его длине. Номинальный диапазон рабочих температур – от 100 до 400° с динамическим терморегулированием [2].

Теплоемкость паяного соединения определяется по скорости отклонения температуры наконечника паяльника от ее номинального значения. Термодатчик на основе платинового пленочного терморезистора расположен в главной точке

прижима насадки к нагревателю, напротив крепежного винта, чем достигается максимальное соответствие его показаний реальной температуре наконечника. Снятие показаний производится 16-разрядными АЦП с частотой замеров более 120 раз в секунду. В программу вводится поправка для компенсации температурных потерь на длине от нагревателя до жала наконечника.



Рис. 7.5. Паяльная станция Альфа-100

Для демонтажа эффективны групповые паяльники, которые обеспечивают одновременный нагрев выводов с двух (рис. 7.6,а) или четырех сторон корпуса и захват демонтированного компонента.

В 1930 г. Карл Веллер изобрел новую концепцию паяльного инструмента – паяльный пистолет. Нагревательный элемент и паяльное жало объединены в этом инструменте и состоят из специального сформированного медного проводника, чье максимальное сопротивление сконцентрировано на наконечнике в форме клина [3]. Этот проводник подсоединяется через низковольтный вторичный трансформатор, размещенный в пластмассовом корпусе в форме пистолета (рис. 7.6,б). Спусковой курок включает пистолет или выключает и иногда выбирает одну из двух рабочих температур. Преимущества паяльного пистолета: быстрый нагрев и охлаждение, небольшой и маневренный наконечник, недорогой нагревательный элемент, возможность контроля температуры спусковым курком. Недостатки: большая масса и объем, значительный ток, протекающий через наконечник, необходимость работать маленьким наконечником при высокой температуре для компенсации недостатка тепла, наличие магнитных полей.

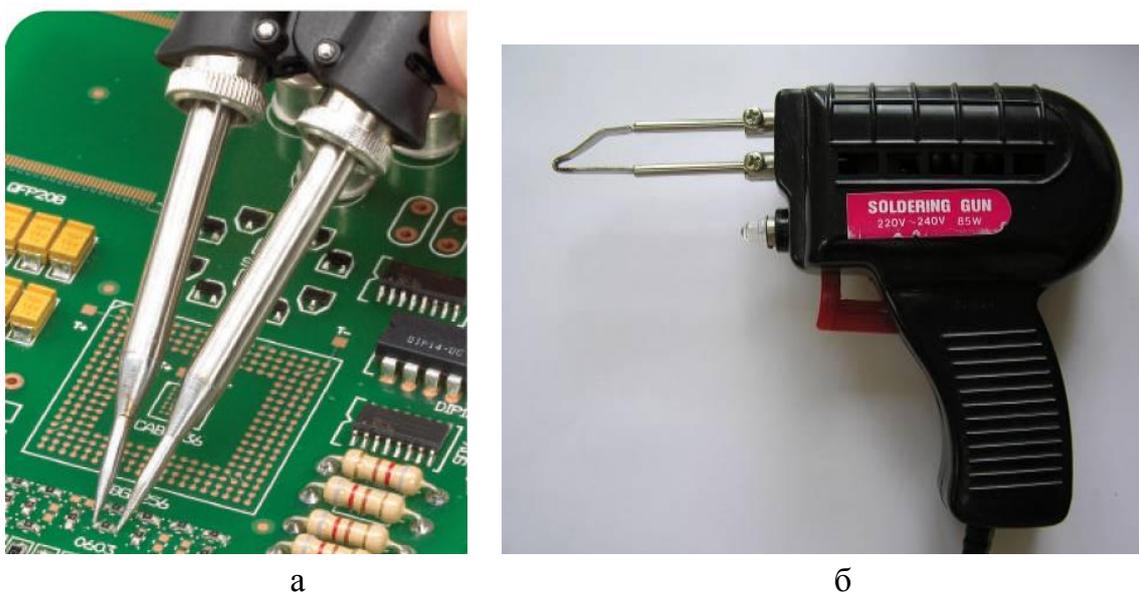


Рис. 7.6. Пайка групповым паяльником (а) и паяльный пистолет (б)

Паяльный пистолет Ungar 6760 имеет жестко заземленный изолированный наконечник для защиты чувствительных интегральных схем. Твердотельные компоненты заменяют тяжелый, генерирующий магнитные поля трансформатор, и масса паяльника снижена до 140 г. Мгновенный выбор двух температур 500°F или 900°F производится переключателем, отделенным от спускового курка.

Модель 450 All Gun фирмы Wen – температурно - контролируемый пистолет, который имеет три жестких сменяемых наконечника: "карандашный" наконечник мощностью 25–100 Вт для печатных плат, 100–200 Вт мощности наконечник для внутреннего монтажа приборов и 200–450 Вт мощности наконечник для паяк швов по закладным деталям припоя. Паяльные наконечники мощных пистолетов массой 200 г имеют специальное покрытие для гарантии более чем 30000 паяных соединений.

Одной из разработок фирмы PDR является паяльно–ремонтный центр IR-X410 для места монтажа или демонтажа любых SMD, включая как соединители, так и чип-компоненты, а также BGA микросхем с размерами от 25 мм до 70 мм (рис. 7.7). Прецизионный вакуумный установщик микросхем гарантирует точность позиционирования. Контроль нагрева микросхемы осуществляется в реальном времени. Программное обеспечение позволяет установить любой температурный профиль с возможностью контроля температуры в восьми точках. Для равномерного нагрева платы нижний подогреватель увеличен до 240×300 мм.

Примером оборудования среднего класса могут служить полуавтоматические паяльные станции серии PDR 1500, оснащенные персональным компьютером для управления процессом пайки и имеющие нижний нагреватель мощностью 500 Вт и верхний фокусируемый нагреватель мощностью 150 Вт, установленный на штативе.



Рис. 7.7. Паяльно-ремонтный центр IR-X410

В верхнем нагревателе могут использоваться различные сменные линзы, обеспечивающие фокусировку ИК излучения на пятне диаметром от 4 до 70 мм. Область нагрева нижнего нагревателя имеет размер 120×120 мм. Станции серии PDR 1500 подходят для монтажа и демонтажа компонентов в корпусах BGA, MicroBGA, QFP, PLCC, SOIC, SMD компонентов, а также разъемов.

7.2. Пайка элементов в отверстия печатных плат

При пайке погружением плата модуля опускается в расплавленный припой, который является источником нагрева. Так как переход тепла от жидкого припоя большой массы (50 кг и более) к контактным площадкам и выводам компонентов происходит достаточно быстро, то температура пайки достигается в течение 1–2 с. В зависимости от характера движения платы по поверхности припоя различают следующие способы пайки: вертикальным или наклонным перемещением платы, колебательным движением платы, протягиванием платы по поверхности припоя, избирательной подачей припоя. Погружение платы в припой с вертикальным перемещением осуществляют на глубину, не превышающую её толщину.

Технологические параметры: температуру расплава припоя в интервале 260 – 280°C поддерживают с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$ и время погружения в пределах 4 – 6 с. Поверхность припоя при пайке должна быть чистой от окислов, которые удаляются скребком перед каждым погружением платы. При вертикальном погружении и извлечении платы наблюдается ряд недостатков, которые связаны с условиями удаления жидких и газообразных остатков флюса и излишков припоя. Затрудненность выхода остатков флюса на поверхность припоя может привести к "захвату" флюса припоя и образованию ложных паек. Припой не успевает стекать с платы и образует сосульки, короткозамыкающие мостики.

Недостатками процесса : низкая производительность, что определяет его пригодность для мелкосерийного производства; невысокое качество паяных соеди-

нений, значительный процент дефектных соединений; повышенный расход припоя; значительное термическое воздействие на плату. Ряд этих недостатков устраняется при наклонном погружении и извлечении платы. При погружении под углом 5-7° обеспечивается удаление газовых фракций флюса и продуктов реакции, а также стекание припоя с паяемой поверхности платы.

Удачным сочетанием способа с наклонным погружением платы и устройства для снятия оксидных пленок является способ пайки в лотке (рис. 7.8, а). Припой находится в неподвижной ванне 1, а плата 2 с установленными компонентами, укладывается наклонно в держатель 3 лотка 4. Лоток в поперечном сечении имеет форму треугольника с вершиной угла, направленной вглубь ванны.

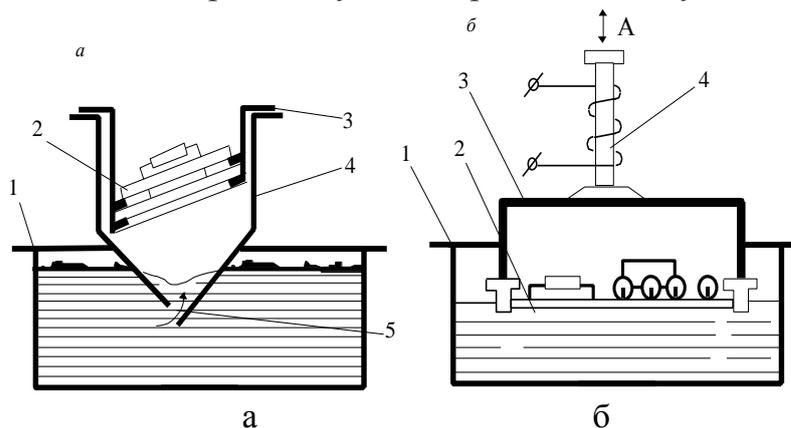


Рис. 7.8. Способы пайки в лотке (а) и с вибрациями (б)

При опускании лотка в расплав припоя треугольное днище рассекает пленку окислов на поверхности припоя и своим приемным отверстием 5 начинает забирать припой из глубины ванны. При этом создаются условия для постепенного удаления из зоны пайки жидких и газообразных остатков флюса, подачи в нее чистого припоя.

Повышения качества паяных соединений в платах с металлизированными отверстиями достигают применением колебательных движений платы, закрепленной в держателе (рис. 7.8,б). На плату подают механические колебания частотой 50–300 Гц и амплитудой 0,5–2,0 мм, получаемые от электромагнитного вибратора, либо УЗ колебания частотой 20–44 кГц и амплитудой 10–20 мкм [4]. Механические вибрации способствуют проникновению припоя в металлизированные отверстия, удалению остатков флюса, улучшают структуру припоя в соединении. УЗ колебания разрушают оксидные пленки и улучшают смачивание припоем. Недостатки: необходимость надежного фиксирования компонентов на плате; возможность возникновения механических резонансов в компонентах, особенно транзисторах, что приведет к их повреждению.

При пайке протягиванием (**Drag Soldering**) по поверхности припоя плату укладывают в держатель, который под углом 5-10° опускается на поверхность припоя и протягивается определенное расстояние по зеркалу припоя. Впереди держателя имеется скребок, который очищает поверхность зеркала от окислов припоя. При подъеме платы излишки припоя стекают в ванну. Поскольку спо-

койная ванна припоя имеет меньшую склонность к окислению, то состав и чистота припоя поддерживаются с хорошим постоянством. Скорость протягивания составляет 5–8 м/мин, время для одной платы - до 10 с. Установки пайки (рис.7.9) легко встраиваются в обычный сборочный конвейер. Недостатки— относительно большое время пайки и связанное с этим значительное тепловое воздействие на поверхность платы. Эти недостатки устраняют применением защитных масок на паяемую поверхность платы.

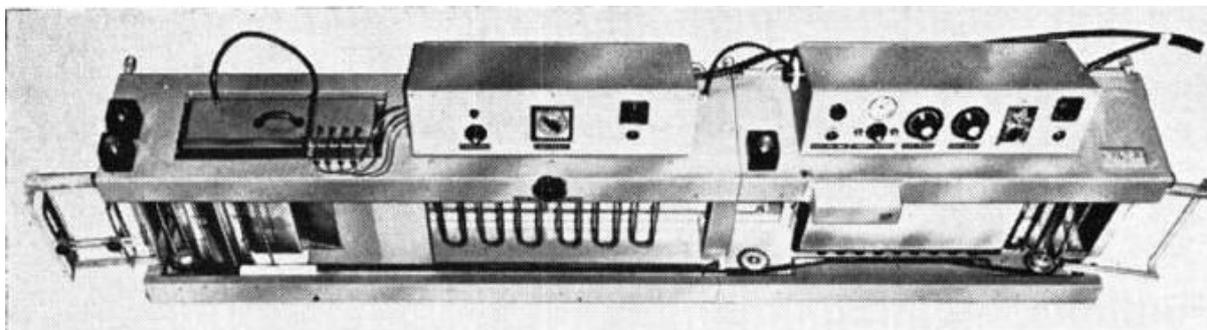


Рис. 7.9. Установка пайки протягиванием

Для избежание коробления плат при пайке погружением термочувствительных элементов применяют избирательную пайку, которая заключается в подаче припоя только в места пайки. Ванна с припоем закрыта кондуктором, в котором имеются отверстия, точно соответствующие числу и расположению зон пайки. Припой подается поршнем, который выдавливает его через отверстия кондуктора в места пайки. Недостаток— трудность перестройки на другой типоразмер плат.

Пайка волной (**Wave Soldering**), впервые предложенная в 1955 г. компанией Philips, до сих пор остается самым распространенным в промышленности способом пайки печатных плат для крупносерийного и массового производства электронных модулей с выводными электронными компонентами. Специфические преимущества этого процесса заключаются в высокой производительности механизированного движения плат относительно припоя; возможности создания автоматизированных установок, выполняющих полный комплекс операций: обезжиривание, флюсование, подогрев, пайку, отмывку от флюса и сушку; взаимодействию платы с чистой поверхностью припоя в короткий промежуток времени, что снижает термоудар, коробление диэлектрика, перегрев элементов. Недостатки: большая масса припоя в ванне (100-500 кг), значительные габариты оборудования (несколько метров), большее окисление припоя по сравнению с погружением.

Технологические основы метода пайки водной вытекают из характера взаимодействия потока припоя с платой. Главным условием высокой разрешающей способности пайки волной припоя, позволяющей без перемычек, мостиков и сосулек припоя паять платы с малыми зазорами между печатными проводниками является создание тонкого и равномерного слоя припоя на проводниках платы, что в свою очередь формирует паяные соединения "скелетной формы".

Процесс пайки состоит из трех этапов: вхождение в припой (точка А), контактирование с припоем (отрезок АВ) и выход из припоя (точка В) (рис.7.10). На первом этапе направление фонтанирования волны V_A способствует удалению паров флюса из зоны контакта, как при двусторонней, так и при односторонней волне. На втором этапе полоса растекания припоя по плате АВ в сочетании со скоростью конвейера V_K определяет время пайки. При двусторонней волне это время больше, что обеспечивает более полное заполнение припоем металлизированных отверстий. Увеличение времени контакта повышает толщину припоя на печатных проводниках до некоторого предела. Окончательная толщина слоя формируется на выходе платы из волны в точке В. В односторонней волне продольная составляющая скорости фонтанирования V_B вычитается из скорости конвейера, смывает излишки припоя и утончает оставшийся слой припоя. Более благоприятны горизонтальное положение конвейера, пологая форма и возможно большая скорость циркуляции припоя. Глубина погружения составляет 0,6–0,8 от толщины платы, но может достигать 1,5–2,0 толщины с носовым козырьком в передней части кассеты. В двусторонней волне скорость V_B складывается со скоростью конвейера V_K и способствует образованию наплывов, поэтому увеличивают угол наклона, крутизну волны и уменьшают скорость фонтанирования.

Время волновой пайки электронного модуля не должно быть более:

$$t = 0,06L_K / V_K \leq 3 - 4c, \quad (7.3)$$

где L_K – длина контакта платы с волной припоя, мм;

V_K – скорость конвейера, м/мин.

Односторонняя волна применялась в более ранних установках со скоростью конвейера 0,5–1,5 м/мин. Двусторонняя волна используется в линиях пайки ЛПМ-500 и TDF фирмы Hollis (США), имеющих скорость конвейера до 2,5 м/мин, пенный флюсователь, подсушку флюса.

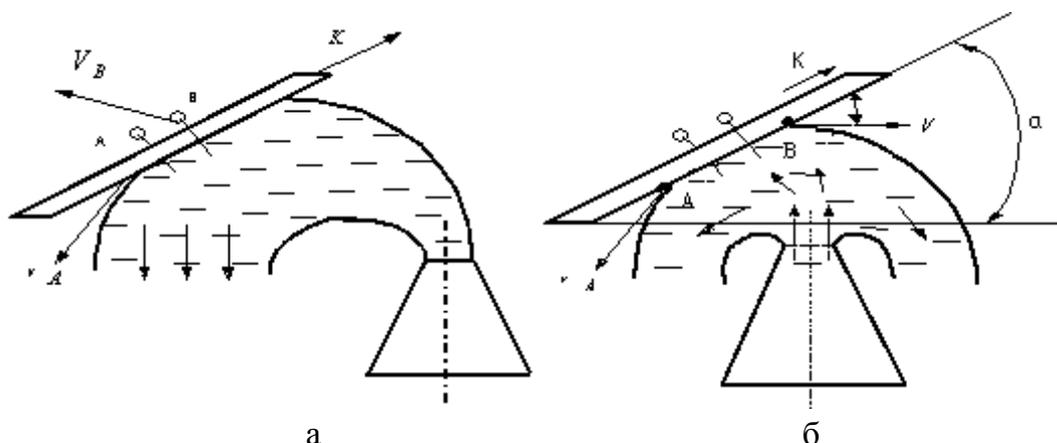


Рис. 7.10. Схемы взаимодействия односторонней (а) и двусторонней (б) волны с платой

Наряду с двусторонней параболической волной применяют другие профили волн (рис. 7.11): плоскую или широкую (а), вторичную или "отраженную" (б), дельта – волну (в), лямбда – волну (г), омега - волну.

Плоская или широкая волна имеет протяженность до 70–90 мм, что значительно увеличивает площадь контакта между платой и припоем. Это дает возможность значительно увеличить производительность процесса пайки, например, скорость движения платы до 3 м/мин в установке ASTRA фирмы Hollis. Подобная конфигурация волны позволяет получать качественные паяные соединения при меньшей температуре припоя, чем при пайке волной параболической формы. К недостаткам данной волны относится увеличенная открытая поверхность расплава, способствующая образованию окисных пленок в припое. Вторичная волна образуется за счет наклонного отражателя с одной стороны сопла, что обеспечивает удержание определенного количества припоя в виде волны меньшей высоты. Температура во вторичной волне меньше, чем в основной. За счет взаимодействия платы с вторичной волной происходит оплавление сосулек припоя и повторная пайка соединений.

Дельта - волна характеризуется стоком припоя в одну сторону, для чего одна стенка сопла выполнена удлиненной, а также большим напором припоя, что обеспечивает более глубокую волну для пайки элементов с удлиненными выводами, например, разъемов. Недостаток – большая чувствительность высоты волны от степени нагнетания припоя в сопловой насадке.

Лямбда – волна, предложенная фирмой Electrovert (Канада), использует насадку сложной формы и имеет передний со стороны платы крутой слив припоя и длинный практический горизонтальный профиль волны на выходе платы. На входе платы в волну формируется ускоренный поток припоя, обладающий хорошим смачивающим действием и проникающей способностью в отверстия. На выходе устанавливается практически нулевая относительная скорость платы припоя, а постепенное увеличение угла между платой и поверхностью припоя устраняет образование наплывов и сосулек.

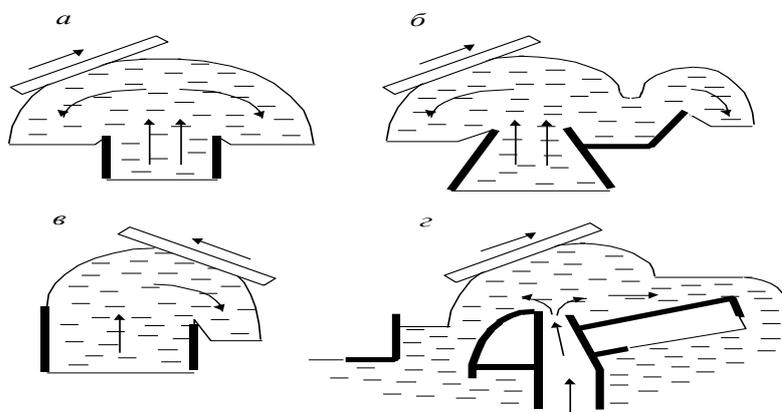


Рис. 7.11. Профили волн для групповой пайки

Такой профиль волны с высотой от 13 до 19 мм позволяет вести качественную пайку многослойных плат с плотным монтажом на установке WSV фирмы

Electrovert при скорости конвейера до 5,4 м/мин.

На базе лямбда - волны фирмой Electrovert создана вибрирующая омега - волна за счет размещения вибрирующего элемента в окне сопла, через которое подается припой. Вибрация элемента создается с помощью электромагнитного вибратора, работающего на частоте 60 Гц с изменяемой амплитудой колебаний 1–3 мм. Оптимальные параметры пайки: скорость конвейера 1,2 м/мин, температура припоя в ванне 250°C, амплитуда вибраций 1,0–1,3 мм. За счет придания турбулентности волне припоя обеспечивается заполнение металлизированных отверстий в платах на уровне 99%, количество дефектов в виде непропаев сокращается в два раза. Омега - волна используется в установке Century 2000 фирмы Electrovert, имеющей скорость конвейера до 6 м/мин [5].

Установки волновой пайки оснащаются устройствами, обеспечивающими плавное регулирование скорости движения транспортера от 0,3 до 3,0 м/мин; прекращение пенообразования флюса при выключении транспортера; автоматическую остановку платы над ИК нагревателем для подогрева плат толщиной более 1,5 мм; подачу защитной жидкости на волну припоя. Температурно-временной профиль волновой пайки приведен на рис. 7.12.

На линии SOLTEX (Голландия) осуществляют двухступенчатую пайку по схеме: пенное флюсование–подогрев–пайка протягиванием по поверхности припоя–охлаждение–обрезка выводов фрезой с подзаточкой и пневматическим реверсом–очистка щетками–флюсование–подогрев– пайка волной припоя, что сокращает расход припоя, обеспечивает однородность паяных соединений с заданной высотой выводов над поверхностью платы.

Микроминиатюризация модулей привела к увеличению плотности компоновки, размеры проводников на плате уменьшились до 0,25 мм, а зазоры–до 0,125 мм, число выводов на компонент возросло до 200. Остающийся на плате избыток припоя образует соединений заливной формы, которые менее надежны, чем соединения видимого контура, способствует возникновению перемычек, коротких замыканий элементов и проводников, а также сосулков припоя.



Рис. 7.12. Температурно-временной профиль волновой пайки компонентов со штыревыми выводами

Примером нового подхода к технологии пайки волной припоя является концепция воздушного ножа, предложенная фирмой Hollis Engineering (США) (рис. 7.13). Поток горячего воздуха, направленный на плату 1 удаляет с нее излишки припоя, перемычки и сосульки. Конструктивно сопло 2 изготавливается из нержавеющей стали, встроенные нагреватели внутри сопла обеспечивают нагрев воздуха до температуры 375–390°С при давлении 0,3 МПа. Горячий воздух направляют на паяемую сторону платы через 6–8 с после ее выхода из волны под углом 40–42° и на расстоянии до 20 мм от поверхности платы. Поскольку нагрев воздуха сопровождается значительными затратами электроэнергии, то установки оборудуют автоматической системой, включающей подачу воздуха при выходе платы из волны [6].

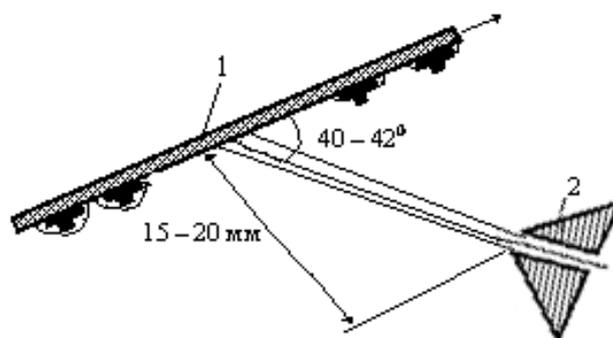


Рис. 7.12. Схема воздушного ножа

Воздушный нож используется в установках GBS Mark 3 и SPS фирмы Hollis, оборудованных модулем двойной волны припоя, предварительным ИК - подогревом плат с 2-х сторон и скоростью конвейера – до 3,6 м/мин.

Сокращение брака и обеспечение высокого процента выхода годных модулей (до 95% и выше) достигается компьютеризацией процесса волновой пайки. Компьютер не только позволяет улучшить качество соединений, но и увеличить в 10 и более раз скорость контроля. Для компьютерного управления необходимо для каждого электронного модуля сформировать матрицу параметров, таких, как тип печатной платы, длина выводов элементов, скорость и ширина конвейера, температура подогрева платы, плотность флюса, температура пайки и другие. Микропроцессорными системами управления оснащены установки SPS фирмы Hollis, Gemini 400 FH фирмы Sensbey (Япония), NFS 300 фирмы Zevatron (Германия), которые обеспечивают рекомендуемый температурный профиль волной пайки. Установки серии ETS330 фирмы ERSA имеют модульную конструкцию (рис. 7.14), что позволяет их конфигурировать в соответствии с требованиями серийного производства. Дополнительная турбулентная волна обеспечивает качественную пайку SMD. Установки имеют пальчиковую конвейерную систему с максимальной шириной 330–500 мм, пенный флюсователь или флюсователь

распылением с гибкой системой управления и возможностью пайки в инертной среде. Наличие в микропроцессорной системе управления семидневного таймера позволяет оптимизировать время работы установки. Дополнительное подключение к персональному компьютеру увеличивает число рабочих программ и дает визуальное представление о текущих процессах.



Рис. 7.14. Установка пайки волной ETS330

Волну припоя в установках пайки образуют механическим и электромагнитным нагнетателями. Механический нагнетатель (рис. 7.15) содержит замкнутую полость в ванне 1, на выходе которой установлено сопло 2, в которую нагнетают расплавленный припой крыльчаткой, расположенной на валу 5, связанном ременной передачей с электродвигателем. Плата 4 входит в волну припоя 3 под углом α . Высота гребня волны регулируется изменением числа оборотов электродвигателя постоянного тока с помощью вариатора. Такая конструкция проста, однако, требует наличия дополнительных блокировок от включения двигателя при нерасплавленном припое.

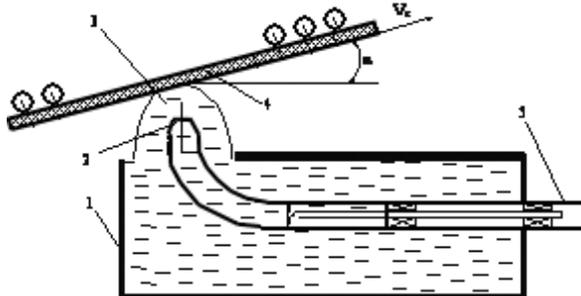


Рис. 7.15. Схема механического нагнетателя

В электромагнитных нагнетателях взаимодействие электрического тока в расплаве и магнитного поля приводит к появлению пондеромоторных сил, направленных перпендикулярно векторам тока и поля и приводящих расплав в движение. Электромагнитный нагнетатель (рис.7.16) содержит Ш - образный магнитопровод 1, между крайними стержнями 2 и 3 которого размещена ванна 4, заполненная припоем. Средний, более короткий стержень 5, примыкает к дну ванны.

Один из крайних стержней 3, соединен со средним стержнем, замыкающим магнитопровод 6, который омывается со всех сторон припоем и образует вторичный короткозамкнутый виток. Нагнетатель имеет обмотки индукционного нагрева 7 и нагнетания 8. При питании переменным током обмоток в зазоре между стержнями 3 и 6 образуется переменное магнитное поле, а во вторичном жидкометаллическом витке индуцируется ток. В результате их взаимодействия припой выбрасывается вверх. Для максимального выброса припоя фазу напряжения питания обмотки 8 выбирают такой, чтобы магнитный поток в рабочем зазоре совпал по фазе с индуцируемым током в расплаве.

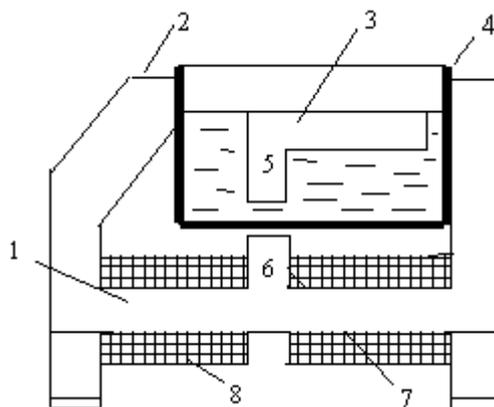


Рис. 7.16. Схема индукционного нагнетателя

Электромагнитные нагнетатели в установках GTF/160 и GTF/330 фирмы KIRSTEN (Германия) (рис. 7.17, а) создают динамическую Jet – волну высотой 5–25 мм при скорости конвейера до 3 м/мин. Преимущества электромагнитных нагнетателей: в зоне нагнетания припой дополнительно нагревается индуцированными в нем электрическими токами; электромагнитные силы перемещают расплав только непосредственно в рабочем канале, что уменьшает окисление припоя; отсутствуют движущиеся детали в припое; высота и температура струи легко регулируются.

Характеристика оборудования волновой пайки различных фирм приведена в табл. 7.3.

Таблица 7.3. Оборудование для пайки волной припоя

Фирма	Модель	Тип	Макс. ширина, мм	Волна припоя	Тип транспортера	Флюсование	Предварительный нагрев	Атмосфера
ERSA	ETS 330	НС	330	ВП, ДВП	ПЛ	Р, П	ИК	КК
ERSA	N-Wave	НП	500	ДВП, ВВ	ПЛ, Л	Р	ПВ, ИК	ИА, КК
Electrovert	Astrapak	НП	400	ДВ, ВВ	Л	Р, П	ПВ, ИК	ИА
Speedline	EPK Plus	НП	400	ДВП, ВВ	Л	Р, П	ПВ, ИК	ИА, КК
Soldematic	96-1200	НП	305	ВП	ПЛ	П	ПВ	
SEHO	MWS824	НП	400	ДВП, ВВ	ПЛ, Л	Р, П	ИК	ИА, КК

SEHO	1025	НС	240	ДВП, ВВ	ПЛ, Л	П	ИК	КК
Streckfuss	E022	НС	250	ЗДВП	ПЛ	П	ИК	–
Technical Devices	Nu/Era Junior 16	НП	406	ДВП, ВВ	ПЛ, Л	Р, П, В	ПВ, ИК	–

Условные обозначения: настольная (НС), напольная (НП) установки; волна припоя (ВП), двойная волна припоя (ДВП), (ВВ) высокая волна; пластинчатый (ПЛ), ленточный (Л) конвейер; (Р) распыление флюса; (П) пенное флюсование, (В) волна флюса; подогрев воздушный (ПВ), инфракрасный (ИК); (КК) компьютерный контроль, (ИА) инертная атмосфера.

Установка пайки волной MWS 2340 в среде азота фирмы SEHO (Германия) имеет 6 зон предварительного подогрева общей длиной 1800 мм, реализованных спомощью ИК модулей мощностью 3 кВт, двойной модуль пайки, систему подачи инертного газа и микропроцессорный блок управления (рис. 7.17, б) и предназначена для пайки поверхностно монтируемых компонентов бессвинцовыми припоями. Потребление азота составляет около 15 м³/ч, а содержание кислорода в рабочей зоне – ниже 100 промиле [6].

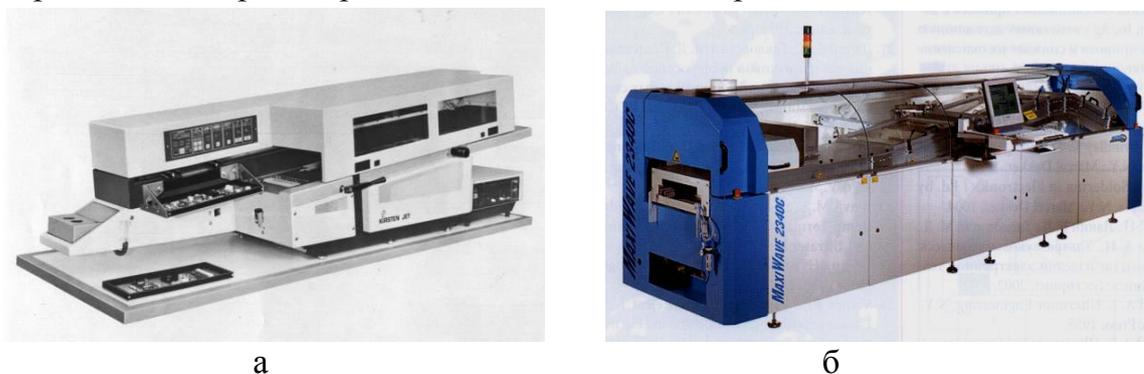


Рис. 7.17. Установка волновой пайки GTF/330 (а) и MSW 2340 (б)

7.3. Пайка элементов с планарными выводами

Для присоединения планарных выводов компонентов используют устройства с точечным или ленточным нагретым рабочим электродом (рис. 7.18). Одноточечный нагрев применяется для сборки для корпусов типа SO или корпусов с четырехрядными выводами. Диаметр наконечника из молибдена в области контакта 0,1 мм. Для пайки используется припойная паста или гальванически осажденный припой на поверхность платы толщиной 15–30 мкм.

Интегральные микросхемы в корпусах типа 4 (401.14-, 402.16-, 405.-24, 429-42 и др.), резисторные, конденсаторные сборки типов B18, B19 в корпусе Flat Pack с планарными позолоченными выводами с шагом 1,25 мм поступают на сборку в этажерочных кассетах, из которых они с помощью манипулятора с вакуумным захватом устанавливаются на поверхность платы.

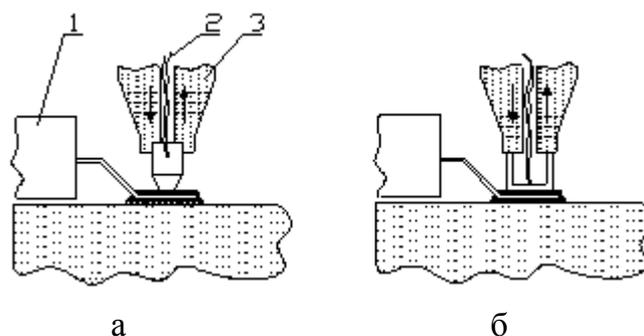


Рис. 7.18. Устройства для пайки компонентов точечным (а) и ленточным (б) электродами: 1 – компонент, 2 – термопара, 3 – электрод

Перед установкой на плату с помощью дозатора наносится клей. По программе палета (держатель) с платой из накопителя подается в рабочую зону, сборочная головка с помощью вакуумного захвата извлекает ИС из кассеты, устанавливает ее на плату и производит пайку выводов. Механизированную пайку планарных выводов ИС ведут несколькими способами: миниатюрными паяльниками, закрепленными в паяльной головке; групповыми паяльниками с подачей тока поперек и вдоль выводов; параллельными электродами; лазерным излучением.

Способ механизированной пайки миниатюрными паяльниками использовался в автомате дозированной пайки АДПМ-1, который имел одну паяльную головку с 2-мя паяльниками, которые поднимались и опускались вместе и порознь, что позволяло вести пайку ИС в различных корпусах (рис. 7.19). Паяльная головка обеспечивала вертикальное перемещение паяльников в пределах до 35 мм, раздвижку на 9–70 мм, прижим паяльника к паяемым выводам в пределах 1–4 Н. Проволочный припой диаметром 0,5 мм наматывался на катушку и по командам от пульта управления электромагнит подавал нужное количество припоя. Величина единичной дозы 0,6 мг. Подавая на электромагнит 1–6 импульсов, величину дозы можно изменять в пределах 0,6–3,6 мг [8]. Время пайки в пределах 0,75–2,75 с задавалось программой с дискретностью 0,25 с. Контроль и поддержание заданной температуры паяльников осуществлялось автоматически электронными потенциометрами с помощью термопар.

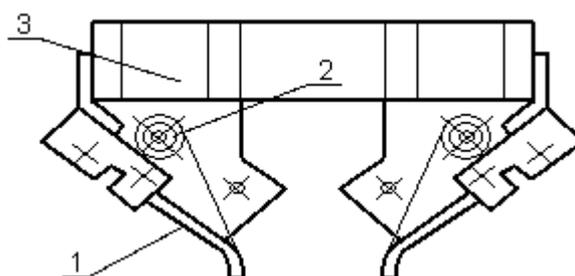


Рис. 7.19. Паяльная головка в установке пайке АДПМ-1:
1 - микропаяльник, 2 - припой, 3 - паяльная головка

Координатный стол перемещался шаговыми двигателями по осям X, Y со скоростью 0,7 м/мин, шагом 1,25 мм и погрешностью не более $\pm 0,04$ мм. Недостатком механизированной пайки паяльниками является низкая производительность до 800 паек/час. Пайка групповым паяльником позволяет повысить производительность процесса пайки до 250–300 соед/мин (1800 паек/час) и получить соединения, не отличающиеся по внешнему виду и свойствам от соединений, паяемых вручную.

Высокое качество достигается при одновременной пайке нескольких выводов одним паяльником (рис. 7.20, а), увеличение числа выводов до 20 приводит к снижению качества паяных соединений ввиду разброса толщины выводов. При числе выводов более 12 разность потенциалов между крайними выводами превышает 5 В, что может привести к выходу из строя ИС. Поэтому импульсные групповые паяльники, в которых потенциал прикладывается поперек рабочего торца и не превышает доли вольта, более предпочтительны (рис. 7.20, б).

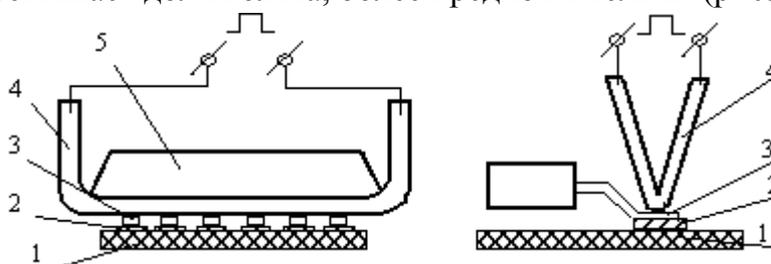


Рис. 7.20. Групповая пайка паяльником с подачей тока поперек (а) и вдоль выводов (б): 1 – плата, 2 – контактная площадка, 3 – вывод, 4 – паяльник, 5 – корпус ИС

Способ групповой импульсной пайки предложен в 60-х годах фирмой "Weltek" (США). В СССР в 80-х годах выпускался автомат сборки и пайки импульсными паяльниками модели АСП–902П, который выполнял операции выбора ИМС в корпусах 401.14-3,4, установки их на платы с приклейкой, групповой пайки с производительностью до 800 шт/ч. Манипуляционной основой автомата являлся модуль МАРС-901, имеющий линейный шаговый развернутый двигатель с платформой, которая перемещается по координатам X и Y над плитой стола (рис. 7.21).

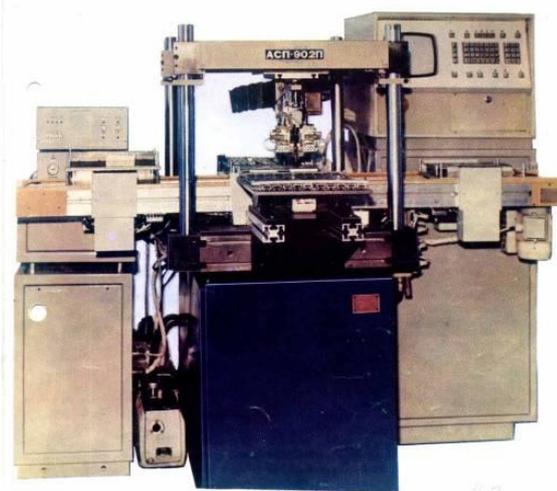


Рис. 7.21. Автомат сборки плат АСП–902П

На платформе закреплены рабочая постановочно-паяльная головка с устройством автоматической смены схватов и устройством нанесения клея, магазин сменных схватов, вибрационные питатели для установки кассет с микросхемами. Клей наносится двумя методами: дозатором либо на дно микросхемы с помощью ванночек с клеем. Система управления – от микроЭВМ. Припой под пайку импульсными паяльниками дозируют нанесением на плату гальванического сплава ПОС61 толщиной 12–15 мкм и последующего оплавления либо слоя припоя до 100 мкм волной припоя.

Время пайки находится в интервале 0,1– 0,4 с. Недостатком является отличие формы паяных соединений от пайки ручным паяльником, так как на соединениях остается отпечаток торца импульсного паяльника.

7.4. Методы пайки поверхностного монтажа

7.4.1. Пайка двойной волной припоя

Пайка волной припоя находит применение и в технологии поверхностного монтажа, особенно при смешанном его варианте ввиду следующих достоинств: низкая стоимость, высокая производительность; возможность применения традиционных устройств и оборудования. Основными недостатками этого метода, применительно к технологии ПМ, являются высокие тепловые нагрузки на паяемые компоненты, требующие погружение в припой и эффект затенения корпусом выводов компонентов от полного смачивания (рис. 7.22) и другими компонентами. Последний эффект наблюдается чаще всего при пайке компонентов с высоким корпусом и короткими выводами. Кроме этого, пайка волной припоя не обеспечивает качественное соединение при малом расстоянии между выводами (менее 0,5 мм) из-за образования перемычек. Этот метод используется в основном для пайки компонентов в корпусах типа Chip, Melf, SOD и SOT [9].

Поэтому разрабатываемое оборудование для пайки волной постоянно совершен-

шенствуется, в частности, наиболее эффективно для ПМ применяется в последние годы методы пайки реактивной струей и двойной волной припоя. Более совершенной для ПМ является схема пайки реактивной струей (рис. 7.23), которая обеспечивает лучшее смачивание всех выводов. Недостатком такого способа является образование излишков припоя на контактных площадках.

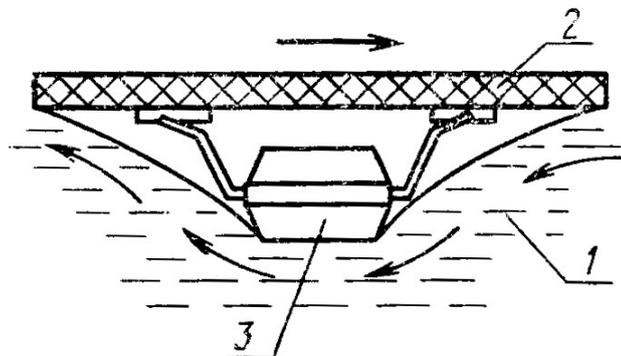


Рис. 7.22. Схема эффекта затенения при пайке волной: 1– волна припоя, 2– плата, 3– корпус компонента

Объединение в одной установке последних двух схем привело к созданию установок пайки двойной волной припоя, которые в наибольшей степени отвечают требованиям технологии ПМ. Первая волна делается турбулентной и узкой, под большим давлением оmyвает компоненты (давление подбирается таким образом, чтобы исключить смывание компонентов), обеспечивая более эффективное смачивание мест пайки (рис. 7.24). Однако это не исключает образование перемычек, которые устраняются второй пологой и ламинарной волной с малой скоростью течения. Вторая волна завершает формирования галтелей в местах паяк. Волны могут создаваться с помощью одного или двух насосов с независимым управлением высотой и скоростью истечения волны. Кроме этого в таких установках для удаления перемычек могут применяться воздушные ножи, обеспечивающие обдув платы после второй волны потоком горячего воздуха [9].

Из температурно-временных диаграмм методов пайки одной и двойной волной припоя (рис. 7.25) видно, что для уменьшения термического удара на SMD разница между максимальными температурами подогрева и пайки примерно на 50°С меньше, чем при обычной пайке, и во втором случае характерны два температурных пика, соответствующие турбулентной и ламинарной волнам.

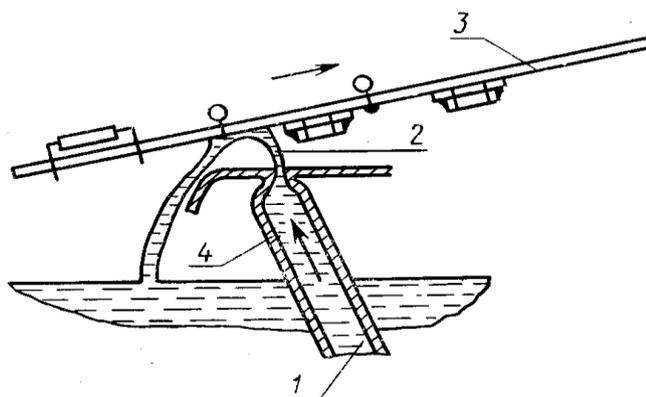


Рис. 7.23. Схема пайки реактивной струей: 1 – припой; 2 – струя; 3 – плата; 4 – форсунка

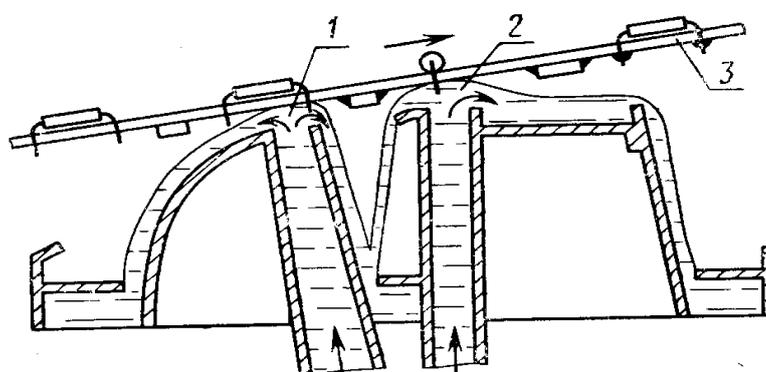


Рис. 7.24. Схема пайки двойной волной: 1 – турбулентная волна; 2 – ламинарная волна; 3 – плата

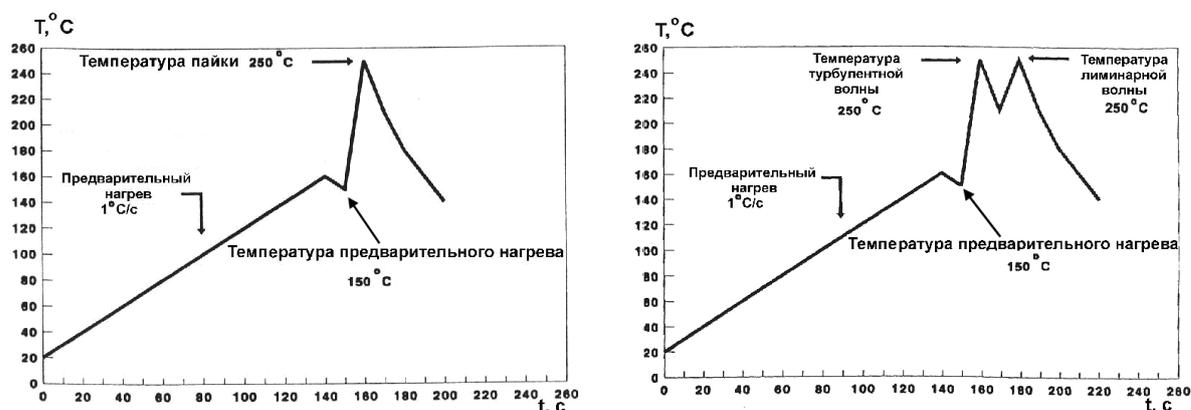


Рис. 7.25. Температурно-временные профили пайки одной и двумя волнами припоя

7.4.2. Конвективные методы пайки

В настоящее время широкое применение для пайки SMD получили ИК печи оплавления припоя. Печи фирмы Electrovert Omni Flex (рис. 7.26) имеют комбинированный конвейер с программным управлением его шириной 300–500 мм, управляемую скорость воздушного потока с градиентом температур $\pm 1^\circ\text{C}$, тем-

пературой нагрева в пределах 150–350°C, систему бесперебойного электропитания.

Электронные сборки с плотным двухсторонним смешанным монтажом представляют технологически сложную задачу для серийного производства. На плате может размещаться до 90% компонентов поверхностного монтажа, а остальное – разъемы, переключатели и трансформаторы, выводы которых монтируются в отверстия платы.

Пайка таких компонентов выполняется, как правило, вручную и приводит к увеличению трудозатрат и существенному влиянию человеческого фактора. Наиболее эффективной технологией их сборки является нанесение паяльной пасты, установка SMD, оплавление в конвекционной печи, установка компонентов в отверстия и пайка по селективной технологии.



Рис. 7.26. ИК печь оплавления припоя Omni Flex

Для пайки компонентов на печатных платах в мелкосерийном и единичном производстве, а также для ремонта электронных устройств используются портативные термовоздушные паяльные станции. Их достоинством являются малые размеры, большая разновидность насадок для монтажа/демонтажа различных видов корпусов, наличие вакуумного пинцета для захвата компонентов. Портативная термовоздушная паяльная станция АОУУЕ 852А используется в основном для ремонта и создания макетных образцов различных электронных устройств. Станция оснащена различными видами сменных насадок для термофена (рис. 7.27) и вакуумного пинцета, имеет цифровой контроль температуры и скорости воздушного потока [11].

Бесконтактный монтаж/демонтаж SMD компонентов на поверхности печатных плат горячим воздухом всегда был процессом эмпирическим. Температура воздуха в месте пайки регулируется двумя параметрами: установленной мощностью нагревательного элемента, через который пропускается воздух, и скоростью воздушного потока. При этом реальная температура воздуха на выходе из сопла выставляется весьма приблизительно по градуировочным характеристикам для каждой головки.



Рис. 7.27. Термовоздушная паяльная станция AOYUE 852A

Тем не менее, ими пользуются очень редко, как правило, даже не обращая особого внимания и подбирая тепловой режим методом проб и ошибок. Процесс пайки ИС с помощью термофена представлен на рис. 7. 28.

Расстояние от сопла до припаиваемого компонента очень критично. Увеличение скорости воздушного потока снижает рассеяние воздуха при выходе из сопла, но требует увеличения температуры нагревателя, так как более высокая скорость прохождения воздуха через нагреватель снижает разогрев воздуха. Кроме того, геометрические размеры головок и их сопел, равномерность воздушного потока через них также влияют на температуру пайки в месте контакта.



Рис. 7.28. Пайка ИС с помощью термофена и рассекателя потока

Следствием неточно выдержанных размеров сопел, особенно в головках для микросхем с большим количеством выводов, является неравномерность подвода тепла к месту пайки.

7.4.3. Селективная пайка выводных компонентов

Для селективной пайки фирмой ERSA разработаны установки Versaflow и Versaflow Multiwave, которые имеют модуль предварительного нагрева комбинированного типа (снизу–ИК нагрев, а сверху–конвекционный), модуль волнообразователя с сервоприводом, который обеспечивает программируемую селективную пайку выводов разъемов и других компонентов, монтируемых в отверстия платы. Набор сменных насадок (рис. 7.29) позволяет подобрать оптимальный по скорости и качеству режим пайки для соединений с различными диаметрами контактных площадок.

Для мелкосерийного многономенклатурного производства фирмой ZIPA-TEC выпущены универсальные и гибкие в работе установки Ecoselct 250 и 460, управляемые контроллером Siemens S7. Система подачи азота в рабочую зону понижает окисление, расширяет технологическое окно процесса, уменьшает риск образования перемычек и улучшает растекание припоя [12].

Флюсующая и паяльные головки перемещаются по осям X–Y с помощью сервопривода в рабочем режиме со скоростью 0,2–1,0 м/мин, а от одной зоны пайки к другой– со скоростью до 15 м/мин. Модуль предварительного ИК нагрева состоит из отдельных нагревателей мощностью 1700 Вт и позволяет задать по программе требуемый температурный профиль нагрева. Дополнительно могут быть установлены модули конвекционного нагрева горячим воздухом для теплоемких многослойных плат с металлизированными отверстиями.

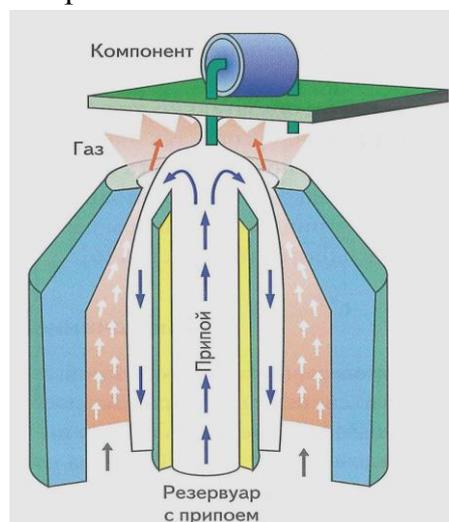
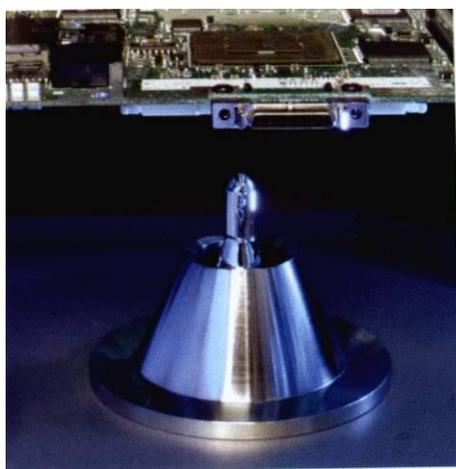


Рис. 7.29. Сопловые насадки для селективной пайки

Скорость пайки плат составляет 5 мм/с. Время работы оператора по загрузке платы, включению флюсователя и волны, приему платы – 12 с, время флюсования–2 с, пайки – 12 с, полный цикл–30 с. Установки отличаются быстрой переналадкой сопел, возможностью работы с бессвинцовыми припоями. Базовая конфигурация установки включает ванну из нержавеющей стали на 25 кг припоя, стандартную паллету, сопло диаметром 6 мм с турбулентной волной, системы

селективного флюсования емкостью 2 литра и пайки в азотной среде с расходом азота 2–3 м³/ч.

С помощью систем селективной пайки решены следующие задачи [11]:

- SMD и ТНТ компоненты можно размещать на одной стороне платы;
- отпала надобность в прогоне волны по всей поверхности ПП, как следствие – снижение затрат на расходные материалы и сокращение времени производственного цикла;
- снижение затрат на энергоресурсы.

Компания Vitronics Soltec провела тестирование нескольких методов селективной пайки для Fine pitch компонентов, монтируемых в отверстия, и определила, какой метод является наиболее эффективным и при каких условиях получается качественная пайка без образования перемычек. Пайка Fine pitch компонентов выполнялась следующими методами: смачиваемыми наконечниками; несмачиваемыми наконечниками и мультиволной [12].

В первом случае используется специальный паяльный наконечник конической формы, наружная поверхность которого полностью смачивается припоем (рис. 7.30,а). Расплавленный припой вытекает из наконечника во всех направлениях и равномерно стекает по его стенкам. Во время пайки печатная плата располагается горизонтально над наконечником. Благодаря тому, что припой вытекает из наконечника равномерно со всех его сторон, пайка таким наконечником может осуществляться в любом направлении по осям X и Y.

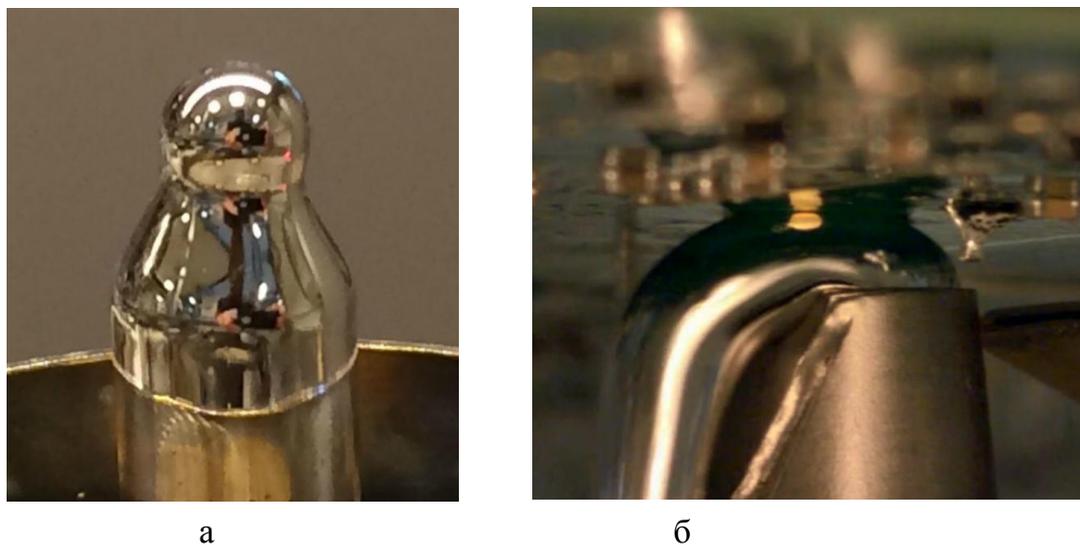


Рис. 7.30. Смачиваемый (а) и несмачиваемый (б) наконечники для пайки Fine pitch компонентов

Пайка смачиваемым наконечником проводилась на печатных платах, содержащих компоненты с шагом выводов 1,27 и 1,0 мм и имеющих различные диаметры контактных площадок и различную длину выступающей части вывода компонента со стороны пайки. В результате пайки оценивалось влияние конструктивных и технологических параметров на процесс образования перемычек

между выводами во время пайки. По результатам пайки установлено, что значительное влияние на процесс образования перемычек оказывает длина части вывода, выступающей со стороны пайки: перемычки при пайке отсутствовали только в тех случаях, когда эта длина была небольшой. Для гарантированного отсутствия перемычек при пайке Fine pitch компонентов длина вывода, выступающего со стороны пайки, должна находиться в пределах от 0,2– 0,5 от шага выводов компонента.

Несмачиваемый наконечник (рис. 7.30,б) обеспечивает формирование направленной миниволны припоя – аналогично процессу, происходящему при волновой пайке. Наконечники изготавливаются из специального термостойкого материала и обладают значительно более длительным сроком службы, чем смачиваемые наконечники. К тому же с помощью несмачиваемых наконечников можно осуществлять пайку при более плотном монтаже компонентов на ПП.

С целью повышения качества пайки несмачиваемыми наконечниками и исключения дефектов образования перемычек между выводами компания Vitronics Soltec разработала и внедрила в своих машинах селективной пайки опцию SDC – "азотный нож". Принцип действия этой опции заключается в том, что во время пайки, осуществляющейся методом протягивания, на передний фронт миниволны подается направленный поток горячего азота (рис.7.31). При этом предотвращается захлестывание припоя через переднюю часть наконечника и тем самым исключается образование перемычек между выводами компонентов.

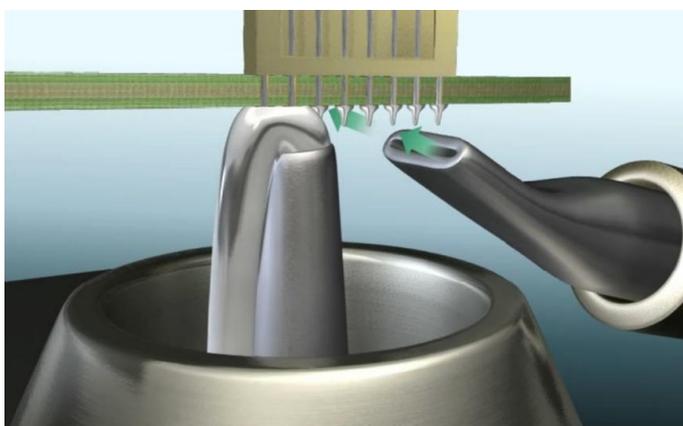


Рис.7.31. Пайка несмачиваемым наконечником с использованием системы SDC

Для гарантированного отсутствия перемычек при пайке Fine pitch компонентов с помощью несмачиваемого наконечника с системой SDC длина выступающей части вывода должна находиться в пределах от 0,7 до 1 от шага выводов компонентов, при этом объем подаваемого через систему SDC азота должен составлять от 8 до 10 л/мин.

Мультиволна представляет собой систему с несколькими наконечниками, сконфигурированными под конкретную плату и обеспечивающими групповую пайку всех выводов на ПП методом погружения их в стоячую волну, сформиро-

ванную в каждом наконечнике. Пайка мультиволной обеспечивает максимальную производительность при сохранении всех преимуществ селективной волны.

Ключевым технологическим требованием при пайке смачиваемой насадкой является равномерность ее смачивания припоем, поскольку поведение припоя определяется силами поверхностного натяжения. В процессе пайки насадка окисляется и перестаёт смачиваться полностью. Истечение припоя становится неравномерным. Сила поверхностного натяжения припоя становится некомпенсированной в направлении контактов, вследствие чего количество припоя на выводах компонентов становится избыточным, и происходит образование перемычек.

Для предотвращения данного явления используется азотный колпак/обдув азотом в рабочей области, однако полностью проблему окисления волнообразователя азотное облако не решает, поэтому оператору необходимо всё время отслеживать процесс пайки. Данная ситуация возникает 3–4 раза за каждый час работы и требует вмешательства оператора продолжительностью 0,75–2,25 минуты. В итоге за смену на эти цели тратится от 0,5 до 1 часа [13].

Применение несмачиваемой насадки, электромагнитной помпы и титановой ванны позволяет уменьшить временные затраты на техническое обслуживание ванны припоя. Таким образом, суммарная экономия составит 12–18% рабочего времени.

7.5. Демонтаж электронных компонентов

Для демонтажа электронных компонентов с печатных плат разработаны паяльники с системой удаления припоя из металлизированных отверстий (рис. 7.32). Паяльник снабжён сменным наконечником и внутренним нагревателем, что обеспечивает быстрый нагрев при относительно небольшой потребляемой мощности (до 50 Вт). На выходном конце патрубка для разряжения давления воздуха есть инжекционная насадка, которая гибким трубопроводом соединена с клапаном подачи сжатого воздуха, установленном на педали. Через регулятор напряжения нагреватель паяльника подключается к сети напряжением в 36 В. Наконечник подводится к месту распайки на плате, так, чтобы его ось была перпендикулярна плоскости платы [14].

После оплавления припоя нажатием ноги на педаль подается сжатый воздух к инжекционной насадке, что создаёт разряжение, обеспечивающее отсасывание припоя с места распая, после чего педаль отпускается и подача воздуха прекращается. Припой скапливается в камерах сборника паяльника, откуда затем выбирается. Время демонтажа одного соединений составляет 1–2 с.

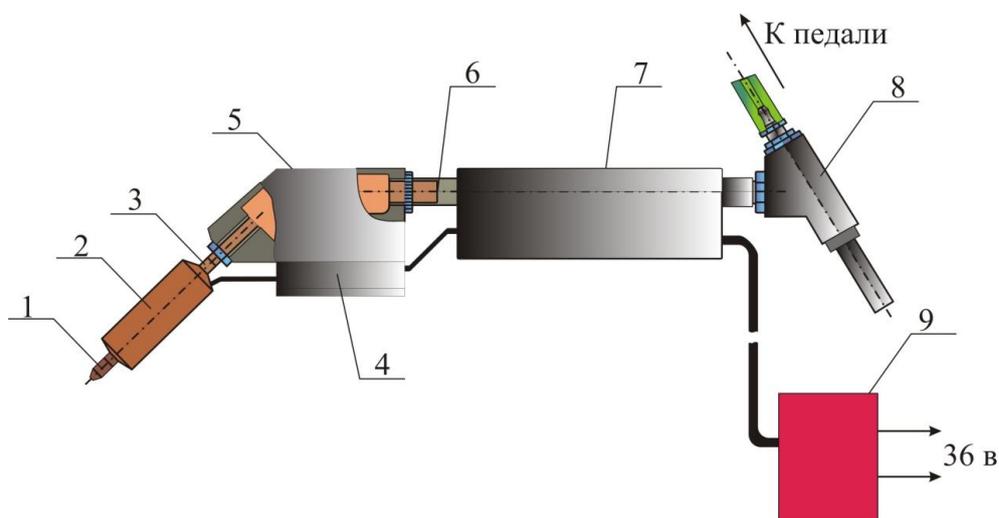


Рис. 7.32. Паяльник для демонтажа электронных компонентов: 1 – сменный наконечник, 2 – нагреватель, 3 – полый стержень, 4 – присоединительная колодка, 5 – сборник припоя, 6 – патрубок, 7 – ручка, 8 – инъекционная насадка, 9 – регулятор напряжения

При необходимости удаления большого количества припоя используют вакуумный отсос, схема действия которого приведена на рис. 7.33, а.

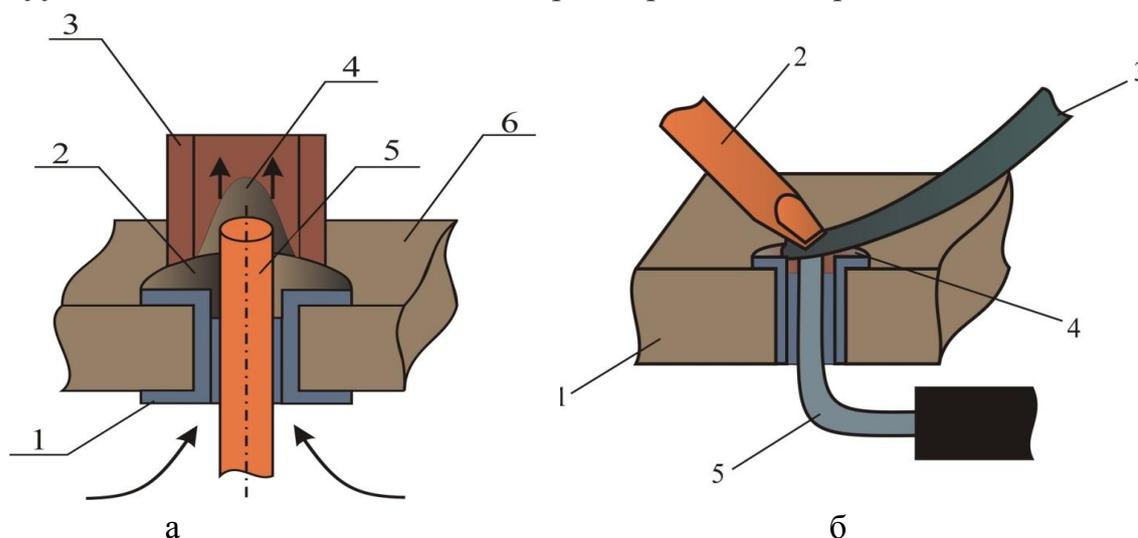


Рис. 7.33. Удаление припоя вакуумным отсосом (а): 1 – металлизированное отверстие, 2 – припой, 3 – наконечник паяльника, 4 – отсос припоя, 5 – вывод элемента, 6 – печатная плата и при помощи фитиля (б): 1 – печатная плата, 2 – жало паяльника, 3 – фитиль, 4 – контактная площадка, 5 – вывод элемента

Основным недостатком метода является необходимость непосредственного физического контакта с поверхностью контактной площадки, что приводит к кондуктивной передаче тепла плате и ее значительному нагреву.

Другим способом удаления припоя с поверхности печатной платы является использование фитиля (рис. 7.33, б), представляющего собой шнур из скрученных тонких проволочек и помещаемого между припоем на контактной площадке и жалом паяльника. При нагреве паяльника припой расплавляется и вса-

сывается внутрь фитиля под действием капиллярного давления, которое тем больше, чем уже зазоры между проволочками шнура. Важна также хорошая смачиваемость и паяемость материала покрытия проволок. Для увеличения количества капилляров необходимо, чтобы шнур состоял из множества тонких и сверхтонких проволок из чистой меди.

Основным достоинством является то, что в точках контакта печатной платы с жалом паяльника не возникает перегрева платы, хотя температура может достигать при распайке 300 – 400°C. Выделяющееся тепло расходуется на расплавление припоя, который мгновенно всасывается фитилём.

Недостатком этого метода является высокая стоимость материала для изготовления фитиля, дополнительные меры его защиты (флюсование), сложность очистки фитиля от припоя и невозможность применения для очистки переходных отверстий, так как в них капиллярный эффект проявляется сильнее.

Для демонтажа электронных компонентов различных конструктивных исполнений, отличающихся размерами и количеством выводов применяют целую гамму специальной оснастки и инструмента (рис. 7.34).



Рис. 7.34. Оснастка для демонтажа компонентов: вакуумный пинцет (а), паяльная станция (б), газовая горелка (в), термофен с двумя соплами (г), пинцеты (д), насадки для термофена (е)

Третье поколение ремонтных центров ИК пайки IR/PL 650 фирмы Ersa специально разработано для бессвинцовой технологии, сложных компонентов (размером от 1×1 до 60×60 мм) и больших размеров плат (460×560 мм) [15]. Процесс установки и удаления микросхем осуществляется в полуавтоматическом режиме, что гарантирует высокую (до 0,01 мм) точность. В состав ремонтного центра входят инструменты контактного типа с микропроцессорным регулированием температуры и инфракрасные излучатели (рис. 7.35). Инфракрасная часть станции включает два излучателя: верхний и нижний. Нижний ИК излучатель (350×450мм) мощностью 3,2 кВт служит для прогрева обширной зоны пе-

чатной платы до 120–150°C с целью уменьшения перепада температур и сокращения общего времени процесса пайки или выпаивания. Верхний ИК излучатель (ИК пушка) создает зону нагрева размерами 60x120 мм. ИК излучение осуществляется на длинах волн 2–8 мкм, наилучших в соотношении отражаемой и поглощаемой тепловой энергии. Нижний ИК излучатель используется для ускорения пайки или демонтажа, предварительного прогрева плат для исключения эффекта «воздушной кукурузы», предотвращения микротрещин керамических chip компонентов.

Лазерный светодиодный указатель служит для подсветки точки в центре рабочей зоны, куда следует установить компоненты для пайки или выпаивания. Среди них: микросхемы в корпусах BGA, CSP, PGA, SOIC, QFP, PLCC, разъемы, экранирующие и сложно профильные элементы. Микропроцессорное управление и малоинерционные нагреватели обеспечивают максимальную термостабильность.



Рис. 7.35. Универсальная паяльно–ремонтная станция IR/PL 650

Диапазон регулировки температуры от 50°C до 450°C. Сервисные функции: автоматическое распознавание инструмента, калибровка температуры под конкретные насадки, память 9 режимов, выбор профиля регулирования температуры («мягкий» для особо чувствительных компонентов или «жесткий» для скоростной пайки массивных контактных соединений в изделиях).

Список литературы к главе 7

1. Кривошей А.В., Бельцев А.Н. Пайка и сварка в производстве радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
2. Frye J. Solder and Soldering Tools // Electronics World. –1971. – V. 85.– № 6. – P.45–48, 65.

3. Мейлицев, В. Станция Альфа-100–мировой уровень от отечественного производителя / В. Мейлицев // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2016. – № 4 (00065). – С. 154–157.
4. Автоматизация пайки печатных плат / С.Л. Буслович, Ю.М. Гельфгат, И.А. Коциньш, Л.Е. Калкут.– М.: Энергия, 1976. – 217 с.
5. Джюд М., Бриндли К. Пайка при сборке электронных модулей. Пер. с англ.– М.: Издательский Дом «Технологии», 2006. – 416 с.
6. Lambert L. Air knives Have an Edge on Solder defect Control // Electron Packaging and Prod. –1984. –V.24. – №2. – P. 178–179.
7. Вахрушев О. Установка для пайки волной в инертной среде от SEHO // Технологии в электронной промышленности. – 2007.– № 4. – С. 28–32.
8. Автоматизация и механизация сборки и монтажа узлов на печатных платах / Под ред. В.Г. Журавского. – М.: Радио и связь, 1988.– 276 с.
9. Prasad R. Surface Mount Technology. – N. Y.: Chapman and Hill, 1997. – 750 p.
10. Мэнгин Ч., Макклеланд С. Технология поверхностного монтажа. – М.: Мир, 1990. –276 с.
11. Попков А. Селективная пайка–возможности и преимущества // Технологии в электронной промышленности. – 2007.– №1. – С. 36–40.
12. Ефанов, В. Селективная пайка Fine Pitch компонентов, монтируемых в отверстия / В. Ефанов // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2016. – № 6 (156). – С. 182–186.
13. Гарбузов, С. Селективная ванна для бережливого производственника / С. Гарбузов // Электроника. Наука, Технология. Бизнес, – 2017.– № 1 (00070).– С. 158–160
14. Ланин В.Л., Парковский В.В. Монтаж и демонтаж электронных компонентов Парковский // Компоненты и технологии. – 2009. – № 2. – С. 54–59.
15. Афанасьев, В. IR/PL650– третье поколение ремонтных центров фирмы ERSA / В. Афанасьев //Технологии в электронной промышленности. – 2006. – № 4. – С. 80–83.

ГЛАВА 8 СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПАЙКИ

8.1. Ультразвуковая пайка и металлизация в электронике

8.1.1. Физические модели ультразвуковых эффектов в расплавах

Введение упругих механических колебаний УЗ частоты 18–70 кГц в расплавленный припой создает в нем кавитацию и ряд сопутствующих явлений: давление УЗ волны, микро- и макропотоки. При интенсивностях ультразвука более 10^5 Вт/м² кинетическая энергия захлопывающихся пузырьков, сконцентрированная в ничтожно малом объеме, трансформируется частично в силовой импульс и частично в тепловую энергию. Из центра захлопнувшегося пузырька распространяется ударная сферическая волна, давление в которой достигает 100–150 МПа, а температура по расчетным данным – 1000^0 С и выше [1]. Кавитационные явления и микропотоки в расплавленном припое приводят к разрушению оксидных пленок на поверхности металла. Давление звукового излучения, а также акустические течения в форме микро- и макропотоков способствуют ускорению процесса смачивания поверхностей припоем.

Активация расплава припоя энергией УЗ поля вызывает в расплаве при интенсивностях ультразвука $(8-10) \cdot 10^3$ Вт/м² появление маленьких пузырьков – зародышей кавитации. Их количество увеличивается с ростом газосодержания расплава или с введением в расплав мелких твердых частиц. Пузырьки, находящиеся в расплаве вблизи паяемой поверхности, пульсируют с частотой УЗ коле-

баний, расширяются и затем захлопываются, создавая ударные волны, давления в которых могут достигать значительных величин. Такие микроудары разрушают оксидные пленки и загрязнения на паяемой поверхности, которая затем хорошо смачивается припоем. Появляющиеся в кавитационной области микро- и макропотоки уносят частицы оксидов и загрязнений, перемешивают расплав, а микроудары способствуют абразивному воздействию частиц твердой фазы, находящихся в расплаве припоя. Кавитация в жидкости вызывает такие эффекты, как ускорение химических реакций, эрозию, сонолюминисценцию и играет главную роль в процессах УЗ активации. Одновременно с процессом кавитации в жидком припое вблизи излучающей поверхности инструмента появляются вторичные эффекты, такие как микро- и макропотоки, которые способствуют удалению оксидных пленок и ускорению процесса смачивания поверхности металла припоем. Высокие температуры захлопывающихся кавитационных пузырьков (до 1000°C) увеличивают температуру расплава, химическую активность участвующих в соединении материалов и интенсифицируют процессы физико-химического взаимодействия между ними. При высокой интенсивности УЗ поля в расплаве возникают и другие эффекты: переменное звуковое давление, «звуковой ветер», кумулятивные течения.

Появление акустической кавитации тесно связано с наличием в жидкостях и расплавах зародышей кавитации – микроскопических газовых пузырьков. Реальные жидкости и расплавы содержат нерастворимые примеси, которые могут быть жидкими, твердыми и газообразными. Зародышами или ядрами кавитации могут служить нерастворенные пузырьки газа, находящиеся во взвешенном состоянии. Кроме того, зародыши кавитации могут образовываться на твердых несмачиваемых жидкостью частицах, имеющих трещины, заполненные нерастворимым газом. Поскольку поверхность трещины не смачиваемая, то заходящая в трещину жидкость будет образовывать относительно газа выпуклый мениск с радиусом R_0 . Условие равновесия на границе раздела расплав–твердое тело определяется выражением:

$$P_2 = P_0 + 2\sigma/R_0, \quad (8.1)$$

где P_2 , – давление газа в пузырьке, P_0 – внешнее давление.

Если угол смачивания $\theta \geq \pi/2 + \alpha$, то поверхностное натяжение препятствует продвижению жидкости в глубь трещины. При увеличении давления газовой смеси внутри пузырька кривизна поверхности раздела между жидкостью и газом меняет знак и газовый пузырек выступает из трещины в виде сферического сегмента, при этом $\theta < \pi/2 + \alpha$. Часть его отрывается под действием гидродинамических сил и находится в жидкости во взвешенном состоянии. Броуновское движение частиц во взвешенном состоянии будет преобладающим при их радиусе $5 \cdot 10^{-7}$ м.

Значения краевого угла смачивания для случая роста зародыша на дисперсных твердых частицах радиусом 10^{-6} – 10^{-7} м составляют 100 – 174° . Твердая час-

тица с дефектом в виде конической или сфероподобной впадины является центром образования зародышей кавитации. Поэтому введение в состав припоя цинка, кристаллы которого не растворяются полностью, а также других частиц должно существенно увеличивать количество зародышей кавитации.

Амплитуда УЗ давления, необходимая для расширения зародыша радиуса R_0 до резонансного (критического) радиуса R_p , определяется из выражения [2]:

$$P_A^{(1)} = P_0 - P_z + \frac{4\sigma}{3\sqrt{3}R_0} \left[1 + (P_0 - P_z) \frac{R_0}{2\sigma} \right]^{1/2}. \quad (8.2)$$

Откуда получаем выражение для критического радиуса:

$$R_p = \frac{4\sigma}{3(P_A - P_0 + P_z)}. \quad (8.3)$$

Пороги кавитации в основном определяются при заданном R_0 величиной поверхностного натяжения, значения которого для расплавов металлов существенно выше (0,348–1,95 Н/м), чем для воды (0,075 Н/м), тогда как резонансная частота f_p зависит как от σ , так и от плотности расплава ρ :

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_p} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho} \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_p} \right)}. \quad (8.4)$$

Для расплавов интервал R_p составляет $4 \cdot 10^{-6}$ – $6 \cdot 10^{-5}$ м, после чего начинается взрывоопасный рост пузырьков газа. Зародыши кавитации, попадающие в область отрицательного давления теряют устойчивость, начинают расти на полупериоде растяжения и быстро захлопываются на полупериоде сжатия. Пузырьки с большими радиусами будут пульсировать в УЗ поле и увеличиваться в основном за счет выпрямленной диффузии.

Особенностью расплавов припоев, используемых для УЗ пайки и металлизации, являются значительно большие плотность и вязкость по сравнению с водой, необходимость учета гидростатического давления столба расплава, а также различие в начальных размерах кавитационных полостей. Гидростатическое давление P_0 с учетом давления столба расплава высотой h может быть определено как:

$$P_0 = P_{ам.м} + h\rho g. \quad (8.5)$$

Динамика кавитационных полостей в расплавах припоев описывается уравнением:

$$P_0 + P_p + P_{вн} - P_n(R) = 0, \quad (8.6)$$

где $P_0 = \frac{3}{2}\rho \cdot \left(\frac{\partial R}{\partial t}\right)^2$ – динамическое давление потока, $P_p = \rho \cdot R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2}$ – равнодействующее

давление, $P_{вн} = P_0 + P_A \cdot \sin \omega \cdot t$ – внешнее давление,

$P_n(R) = \left(P_0 - P_z + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 + P_z - \frac{2\sigma}{R}$ – давление газовой смеси в полости.

Физический смысл уравнения состоит в том, что сумма действующих на любой элементарный объем расплава давлений равна нулю, т.е. кавитационная полость находится в состоянии динамического равновесия в любой промежуток времени. С учетом вязкости расплава уравнение (8.6) приобретает вид:

$$\left(R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 + 4\eta \frac{\partial R}{\partial t} \right) \cdot \rho + P_0 - P_A \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} - P_c - \left(P_0 - P_c + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} = 0. \quad (8.7)$$

Решение нелинейного дифференциального уравнения (8.8) методом Рунге-Кутты-Мерсона с автоматическим изменением шага интегрирования и приближенной оценкой погрешности на каждом шаге для расплава оловянно-цинкового припоя вязкостью 0,85 Па·с с варьированием начальными размерами кавитационных полостей от 1 до 50 мкм, давлением ультразвука от $0,5 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^5$ Па и частотой УЗ колебаний 22, 44, 66 кГц показало [3], что кавитационные полости размером до 5 мкм пульсируют не захлопываясь. С увеличением начального размера до 10–50 мкм увеличивается амплитуда пульсаций полостей и происходит их захлопывание в течении 0,05 – 0,10 с. При УЗ давлениях до 0,1 МПа кавитационные полости пульсируют, с увеличением давления до 0,15 МПа растет резонансный размер полостей и происходит их захлопывание (рис. 8.1, а). С ростом частоты с 22 до 66 кГц размеры кавитационных полостей уменьшаются в среднем в 2 раза, что приводит к уменьшению интенсивности кавитации (рис. 8.1, б).

Для повышения эффективности кавитационных процессов применяют газовое насыщение расплава, когда вводимые в расплав пузырьки газа по размерам не превышают резонансные размеры зародышей кавитации, т.е. $(1-50) \cdot 10^{-6}$ м. Увеличение размеров пузырьков ведет к их преждевременному захлопыванию, а очень малые размеры – затрудняют их кавитационный рост в УЗ поле. При захлопывании пузырька сконцентрированная в ничтожно малом объеме кинетическая энергия трансформируется частично в силовой импульс и частично в тепловую энергию, а из центра захлопнувшегося пузырька распространится ударная сферическая волна.

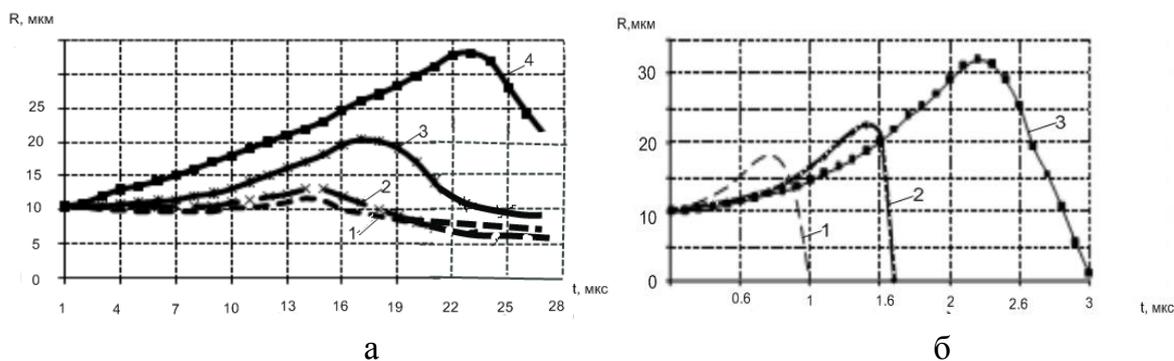


Рис. 8.1. Динамика кавитационных полостей в припое при соответствующих давлениях ультразвука, кПа (а): 1–50; 2–100; 3–150; 4–200 и частотах, кГц: 1–66, 2–44, 3–22

Максимальное давление, согласно Рэлею, на расстоянии, равном 1,587 радиуса от центра пузырька, составит:

$$P = P_o \frac{R_o^3}{6,35R^3}. \quad (8.8)$$

При $R=1/10R_o$ величина давления вблизи поверхности пузырька в 1575 раз превышает давление внутри полости. Радиальная скорость сокращения пузырька V и время смыкания t зависят от соотношения гидростатического давления и плотности среды:

$$V = \sqrt{\frac{3P_o}{2\rho} \left[\left(\frac{R_o}{R} \right)^3 - 1 \right]}; t = 0.915R_o \sqrt{\frac{\rho}{P_o}} \quad (8.9)$$

Время, необходимое для смыкания газового пузырька диаметром 10^{-4} м в оловянно–свинцовом припое – 30 мкс. Высокоскоростная видеосъемка цифровой камерой показала, что скорость захлопывания кавитационных полостей на частоте 22,8 кГц и УЗ давлении 132 кПа около 0,2 м/с [4].

Помимо высоких локальных давлений, возникающих при захлопывании кавитационных полостей, возможно образование и локальных тепловых микрополей. При адиабатическом сжатии объема газа повышение температуры тем больше, чем больше значение γ для данного газа. Для ориентировочной оценки температуры внутри газового кавитационного пузырька в любой стадии его сжатия при адиабатических условиях используют уравнение:

$$T / T_o = (R_o / R)^{3(\gamma-1)}. \quad (8.10)$$

Полагая, что $\gamma=4/3$ и температура расплава 250–300°C, и учитывая, что R может на порядок отличаться от R_o в сторону уменьшения, получаем температуры порядка 2600–3000°C. Другие авторы приводят расчетные данные порядка 1000°C и выше [1]. Высокие температуры, возникающие в пульсирующих кавитационных пузырьках, увеличивают химическую активность как припоя, так и материалов, создают предпосылки для интенсивного протекания процессов химического взаимодействия между ними.

Пульсирование и захлопывание кавитационных полостей вызывает появление в областях, прилегающих к излучателю, микро- и макропотоков, которые имеют различное направление в зависимости от формы поверхности излучателя, амплитуды его колебаний, наличия препятствий на пути распространения и других факторов. В процессах УЗ активации важно формировать микро- и макропотоки таким образом, чтобы они обеспечивали массоперенос микрообъемов припоя к паяемой поверхности и ускоряли тем самым протекание реакций химического взаимодействия компонентов припоя с материалами соединений. Увеличение величины угла наклона боковой излучающей поверхности к оси излучате-

ля от 20 до 45° может вызвать появление в жидкой среде сформированного макропотока в направлении от излучателя к обрабатываемой поверхности, а зона его действия определяется амплитудой колебаний (рис. 8.2) [5].

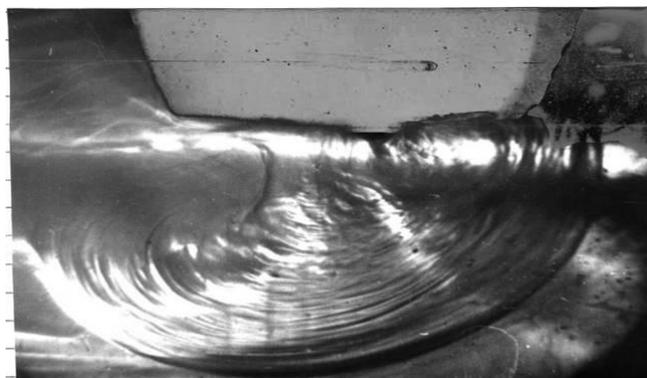


Рис. 8.2. Макропоток в вязкой жидкости

Скорость макропотока может определяться по движению частиц алюминиевой пудры размером 8–10 мкм, находящихся во взвешенном состоянии в жидкой среде. При амплитуде УЗ колебаний 15–20 мкм скорость макропотока в глицерине составляла 0,02–0,03 м/с, а зона действия 10–15 мм, в расплаве припоя–0,01–0,02 м/с, а зона действия не превышала 5–10 мм.

Одна из особенностей воздействия мощного ультразвука на процессы, протекающие в жидкостях и расплавах, существенное увеличение высоты и скорости их подъема в тонких капиллярах, так называемый УЗ капиллярный эффект, открытый академиком Е.Г. Коноваловым (Беларусь) [6]. Вследствие потери устойчивости формы кавитационного пузырька его захлопывание может носить несимметричный характер, что служит причиной образования кумулятивных струй жидкости, радиус которых соизмерим с радиусом пузырька, а скорость близка к скорости захлопывания пузырька. Потенциальная энергия пузырька преобразуется в кинетическую энергию струи, которая, попав в канал капилляра, вызывает увеличение высоты подъема жидкости. При воздействии ультразвука максимальная высота подъема расплава 118 мм наблюдалась в капилляре диаметром 0,55 мм при интенсивности колебаний $16 \cdot 10^4$ Вт/м² и времени подъема 14–20 с.

На межфазной границе расплав–воздух однонаправленное УЗ давление от излучателя создает вспучивание поверхности h . По данным М. Корнфельда при $|x| \leq r$, где x - текущая координата, r - радиус пучка ультразвука, давление компенсируется массой поднятого расплава и давлением, вызванным искривлением поверхности. При $|x| > r$ давление колебаний близко к нулю, а масса поднятого расплава компенсируется давлением, вызванным искривлением поверхности [7]:

$$\sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + \rho gh = P_A, \quad (8.11)$$

где R_1, R_2 – главные радиусы кривизны поверхности.

Высоту подъема расплава (рис. 8.3) в УЗ поле можно определить из условия перемещения определенного объема V под действием давления УЗ, которое преодолевает давления: атмосферное, поверхностного натяжения на поверхности раздела и столба расплава:

$$(P_A - P_o - P_{mp} - \frac{2\sigma}{R}) = \frac{8\eta HV}{\pi R^4}, \quad (8.12)$$

где R – радиус излучателя.

Выражая соответствующие давления через их составляющие

$$\rho c \varpi A - P_o - \rho g H - \frac{2\sigma}{R} = \frac{8\eta HV}{\pi R^4}. \quad (8.13)$$

Преобразуя (8.13) получим

$$h_2 = \sqrt{\frac{(\rho c \varpi A - P_o - \rho g H - \frac{2\sigma}{R}) R^2}{8\eta}}. \quad (8.14)$$

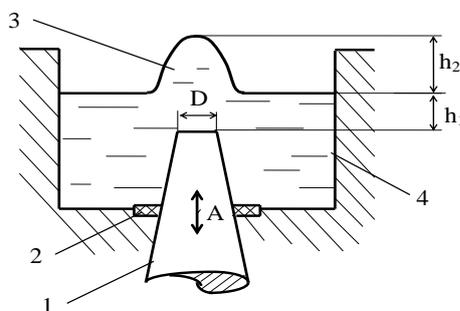


Рис. 8.3. Схема подъема расплава в УЗ поле: 1 – излучатель, 2 – акустическая развязка, 3 – расплав, 4 – ванна

Высота подъема в значительной степени зависит от радиуса излучателя и при амплитуде УЗ колебаний 25 мкм составляет в среднем до 10 мм. При большей мощности УЗ расплав начинает распыляться.

Применение УЗ колебаний при кристаллизации припоя позволяет в определенной степени улучшить качество паяных соединений. Главными эффектами воздействия кавитации и микропотоков на жидкие металлы являются ускорение первичного образования ядер, инициация вторичного зародышеобразования центров кристаллизации вследствие физического перемешивания и ускорения диффузии [8]. Для УЗ модификации сплавов характерны такие эффекты, как измельчение зерна, улучшение однородности структуры [9], смачивающей способности и прочности паяных соединений.

Таким образом, обусловленные кавитацией в расплавах динамические и тепловые эффекты, возникновение микро- и макропотоков, подъем расплава по капиллярам определяют интенсификацию процесса формирования контактных соединений под действием энергии УЗ поля и способствуют увеличению их прочности, достижению равномерности смачивания и растекания припоя.

8.1.2. Удаление оксидных пленок и интенсификация процесса смачивания

В обычном состоянии поверхность металлов покрыта оксидными и неметаллическими пленками. При контакте металлов с газовой средой, органическими и неорганическими веществами образуются неметаллические пленки, которые могут быть с ван-дер-ваальсовой, ионной валентной или ковалентной связями с подложкой. Неметаллические слои органического происхождения удаляют с помощью растворителей, а оксидные пленки, препятствующие осуществлению физического контакта припоя с паяемым металлом, воздействием энергии УЗ поля.

Для УЗ активации возможно использование различных видов механических колебаний, вводимых с помощью излучателей в жидкую фазу и являющихся по своей природе упругими волнами: продольных, сдвиговых, крутильных, комбинированных. В продольных волнах колебания частиц среды происходит в направлении распространения волны, а в сдвиговых - движение частиц перпендикулярно направлению движения волны. Поскольку жидкости и газы не обладают упругостью формы, в них возможно распространение лишь продольных волн. Однако в припое, который является вязкой жидкостью, возможно также образование вязких сдвиговых волн, которые затухают на малом расстоянии от источника. При возбуждении сдвиговых волн конечной амплитуды в тонком слое расплава при условии, если его толщина $h/\lambda \sim 10^3$ в нем возникают вязкие волны, волновой вектор которых направлен перпендикулярно боковой поверхности излучателя [8]. Такие волны быстро поглощаются в направлении от колеблющейся поверхности и проникают на глубину:

$$\delta = \sqrt{\frac{\eta}{\pi \cdot \omega}} \quad (8.15)$$

При возбуждении продольных колебаний на границах раздела сред УЗ волна частично отражается, интерферируя с падающей волной, частично проникает во вторую среду. Давления для падающей, проходящей и отраженной равны:

$$P_1 = p_1 c_1 v_1; \quad P_2 = p_2 c_2 v_2; \quad P_3 = -p_1 c_1 v_3; \quad (8.16)$$

где ρ_1, ρ_2 – плотности сред, c_1, c_2 – скорости распространения ультразвука в средах, v_1, v_2, v_3 – скорости падающей, проходящей и отраженной волн соответственно.

Учитывая, что коэффициенты отражения K_{omp} и прохождения K_{np} по давлению определяются как [10]:

$$K_{omp} = \frac{P_3}{P_1}; \quad K_{np} = \frac{P_2}{P_1}, \quad (8.17)$$

и с учетом того, что $Z_1 = \rho_1 c_1$; $Z_2 = \rho_2 c_2$ и при $x=0$ справедливо выражение

$$\begin{aligned} P_1 + P_3 &= P_2 \\ \frac{(P_1 - P_3)}{Z_1} &= \frac{P_2}{Z_2} \end{aligned} \quad (8.18)$$

Из (8.17) и (8.18) получим

$$K_{omp} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}; \quad K_{пр} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}. \quad (8.19)$$

Анализ выражения (8.19) показывает, что коэффициенты прохождения и отражения существенно зависят от акустических свойств сред. При $Z_1=Z_2$ коэффициент отражения равен нулю и граница раздела акустически прозрачна. Поскольку $Z_1 \gg Z_2$, то есть удельные волновые сопротивления излучателей ультразвука выше удельных волновых сопротивлений жидких сред, то через границу излучатель-припой в случае колебаний, параллельных поверхности, проникает всего 54 % энергии, которая активизирует процессы кавитации, микро- и макропоток. При колебаниях излучателя, нормально к поверхности, прошедшая в расплав УЗ волна испытывает затухание, распространяясь в пределах зазора δ , и в значительной мере проходит в поверхность, так как $K_{пр} > 1$. Таким образом, только 20–25 % УЗ энергии участвует в активации расплава.

При введении в расплав припоя продольных колебаний, интенсивность которых нелинейно убывает при увеличении расстояния от излучателя, необходимо поддерживать постоянной величину зазора в пределах 0,2–2,0 мм для исключения появления макро- и микротрещин в поверхностных слоях хрупких неметаллических материалов за счет ударного воздействия на них УЗ волны, направленной нормально к поверхности. Снижают динамическое воздействие на паяемый материал изменением угла введения колебаний в припой с 90° до $30\text{--}40^\circ$.

Однако процесс пайки или металлизации при малых зазорах между торцом УЗ излучателя и паяемой поверхностью (порядка 0,1 мм) весьма сложен, поскольку требуется строгое поддержание величины зазора и малейшие погрешности могут привести к жесткому контакту излучателя с паяемой поверхностью хрупкого материала с появлением микро- и микротрещин за счет микроударов излучателя о поверхность, а при наличии внутренних дефектов – разрушением материала.

Схема процесса УЗ лужения металлов с помощью излучателя, перемещаемого вдоль облуживаемой поверхности, показана на рис. 8.4. Излучатель 3, погруженный в припой 2 и находящийся на определенном расстоянии от поверхности, чаще всего от 0,2 до 2 мм, создает в расплавленном припое интенсивную кавитацию.

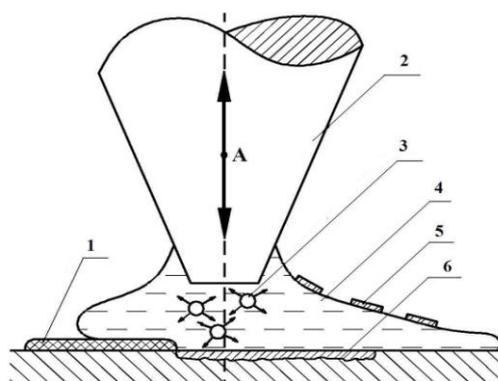


Рис. 8.4. Схема процесса УЗ лужения металлов

Возникающие при захлопывании кавитационных пузырьков 4 гидродинамические удары разрушают оксидную пленку 1 на поверхности металла 6, освобождая доступ припоя к паяемой поверхности и обеспечивая ее смачивание. Образующиеся при этом шлаки 5 всплывают на поверхность припоя. При ручном лужении слой припоя недостаточно равномерный, прочность сцепления имеет также значительный разброс. УЗ лужение металлов в кавитационном режиме сопровождается заметной эрозией основного металла. Весовой коэффициент эрозии K зависит от количества абразивных частиц или первичных кристаллов в расплаве N [10]: $K = \Delta V_{\text{ср}} \rho N / M$, где M , ρ – масса и плотность образца; $\Delta V_{\text{ср}}$ – средний объем металла, удаленного при лужении. Глубина эрозии возрастает с увеличением температуры и для алюминиевых сплавов при температурах порядка 260°C достигает 0,5 мм, что ограничивает применение УЗ лужения для фольги и проволоки диаметром до 0,5 мм. При введении в расплав припоя в качестве абразива порошка ферротитана глубина эрозии возрастает до 0,76 мм.

Кавитационный процесс в жидком припое, содержащем абразивный материал, возникает при допороговых интенсивностях ультразвука. При таком способе лужения, получившем название абразивно-кавитационного, используются припои на основе олова с содержанием цинка 20–50%, микропорошка ферротитана 4–7%. Время лужения составляет 5–40 с при интенсивности ультразвука $(2-8) \cdot 10^4$ Вт/см². Температуры лужения алюминия для некоторых припоев приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1. Температуры УЗ лужения алюминия

Припой	Вид абразива	Температура лужения, °С
Олово	4–5% ферротитана	140–280
П150А	Первичные кристаллы	153–163
П200А	4–5% ферротитана	180–260
П250А	Первичные кристаллы	180–260
П350А	Первичные кристаллы	300–320

Кавитационное давление, измеренное с помощью кавитометра, зависит от процентного содержания цинка в припое (рис. 8.5). Максимальное значение кавитационного давления (до 3,5 кПа) при интенсивности ультразвука 10^5 Вт/м² достигается при содержании цинка 30–40%. Дальнейшее увеличение цинка снижает жидкотекучесть расплава и, значительно повышает температуру лужения [11].

В процессе УЗ лужения часть энергии трансформируется в теплоту и затрачивается на нагрев припоя, что создает эффект увеличения температуры расплава припоя в малом объеме. Этот эффект в большей степени проявляется при длительном озвучивании припоя и увеличении процентного содержания цинка в расплаве.

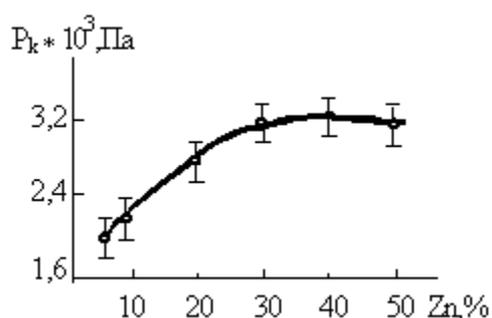


Рис. 8.5. Зависимость кавитационного давления в расплаве от содержания цинка

Таким образом, кавитация и вторичные эффекты ультразвука создают необходимые предпосылки для смачивания расплавом припоя поверхности твердого тела, сопровождающегося понижением угла смачивания и увеличением коэффициента растекания. В обычном состоянии для расплавленного припоя, находящегося на поверхности неметаллического материала, характерно, что $\sigma_{1,3} > \sigma_{2,3}$, т. е. работа сил когезии значительно превышает работу сил адгезии. Расплавленная навеска припоя в результате действия сил поверхностного натяжения и сил тяжести принимает форму «сидячей» капли, смачивание поверхности при этом отсутствует. Если в системе припой–паяемый металл введение флюса позволяет увеличить разность $\sigma_{1,3} > \sigma_{2,3}$ и обеспечить смачивание поверхности металла за счет удаления оксидных пленок с нее, то при пайке неметаллических материалов применение флюсов неэффективно, так как не только паяемая поверхность, но и вся масса материала представляет собой оксидный продукт. Для высокотемпературных припоев на основе бинарных сплавов меди и нагреве 125–130° в вакууме 10^{-3} Па углы смачивания на керамических материалах типа 22ХС не ниже 28–30°. Смачивание пьезокерамики начинается при 1000°С и краевой угол составляет 88–90° [12].

Введение УЗ колебаний в расплавленный припой с помощью волноводного излучателя (рис. 8.6), интенсифицирует процесс смачивания неметаллического

материала. Происходящие при этом изменения в значениях работы сил адгезии и силы смачивания на границе расплавленный припой—паяемый материал отразится на величинах коэффициентов поверхностного натяжения. Сила смачивания на единицу длины периметра смачивания для припоев [13] увеличивается примерно в 5 раз при величине кавитационного давления в припое 1,5–2,0 кПа, что более чем в 6 раз превышает значение коэффициента поверхностного натяжения этих припоев при аналогичных температурах (0,5 Н/м) (рис. 8.7). Изучение динамики УЗ смачивания высокоскоростной киносъёмкой показало, что его продолжительность составляет менее 0,02 с.

Смачивание стеклокерамических материалов в процессе УЗ металлизации достигается за счет удаления газовых пленок и усиления взаимодействия на границе припой – стеклокерамика.

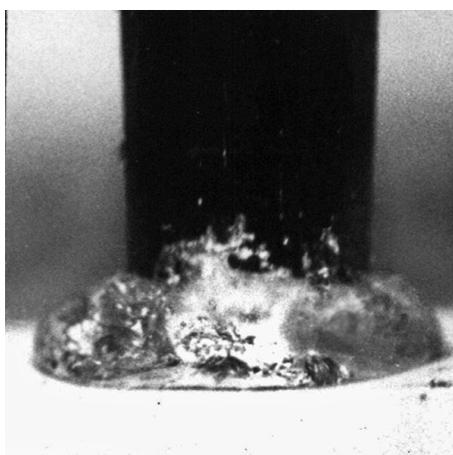


Рис. 8.6. Смачивание поверхности припоем при УЗ активации

Энергия взаимодействия припоя Pb–Sn–Zn–In со стеклокерамикой при угле смачивания 25° , рассчитанная по уравнению Юнга – Дюпре $W = \sigma_{l,2}(1 + \cos\theta)$, составляет 0,95 Н/м, что почти на три порядка превышает энергию дисперсионного взаимодействия при смачивании жидкостями с низким поверхностным натяжением.

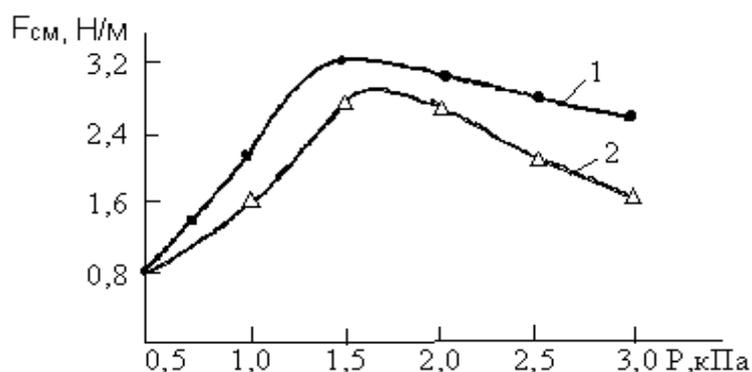


Рис. 8.7. Зависимости силы смачивания на границе припой – стеклокерамика от кавитационного давления в припоях: Pb–Sn–Zn–In (1) и Sn – Zn (2)

Наличие химического взаимодействия при смачивании стеклокерамики припоями в присутствии энергии УЗ поля подтверждается зависимостью степени смачивания от температуры процесса металлизации. При исследовании процесса смачивания сплава АМГ-6 легкоплавкими припоями с температурами плавления ниже 100°C на основе сплава Вуда с добавками металлов Li, Zn, Ga, Ge, In, Pb, Bi, Cd установлено, что температурный порог УЗ лужения находится в пределах 240–280°C. При увеличении мощности УЗ колебаний порог лужения снижается до температуры плавления припоя [14]. Для УЗ металлизации пьезокерамических материалов расплавами чистого олова и припоя ПОС61 установлена зависимость коэффициента смачивания от технологических параметров: времени и температуры расплава. Пороговые значения амплитуды УЗ колебаний составили 15 мкм, а температуры процесса металлизации – 320°C.

Для припоев Sn–Zn (П200А) и Pb–Sn–Zn–In установлено, что смачивание стеклокерамики припоями начинается с 200°C, а оптимальные значения прочности сцепления припоя Pb–Sn–Zn–In со стеклокерамикой 18–19 МПа достигаются в интервале температур 250–270°C и времени 5–7 с, а для припоя П200А – при температуре 320±20°C [15]. Помимо температурного порога, процесс УЗ металлизации характеризуется определенным временным интервалом, зависящим от инерционности процессов физико-химического взаимодействия между припоем и паяемым материалом.

Для улучшения смачивания керамических материалов в состав припоев вводят добавки активных элементов (Ti, Zr или Hf). Основная химическая реакция между Ti и оксидами керамики имеет вид [16]:



Содержание Ti в припоях типа SnAg5 не превышает 3–4 %. УЗ активация пайки керамики припоем с добавкой активного металла происходит в температурном диапазоне 240–280°C.

8.1.3. Диффузия и химическое взаимодействие расплавов с паяемыми материалами

При воздействии УЗ колебаний в расплавах металлов происходит интенсификация процесса диффузии в жидком состоянии, что связано с изменением коэффициента диффузии, вязкости среды, а также с появлением микро- и макропотоков. Воздействие мощного УЗ поля на расплав увеличивает коэффициент диффузии и активизирует процесс зародышеобразования:

$$D' = D_0 \cdot e^{-\frac{E-\Delta E}{R \cdot T}}, \quad (8.21)$$

где ΔE - изменение энергии активации диффузии в УЗ поле.

Так как толщина диффузионного слоя в значительной степени зависит от ин-

тенсивности перемешивания жидкости вблизи поверхности твердого тела, ускорению диффузионных процессов в УЗ поле во многом способствуют акустические микро- и макропотоки. Скорость микропотоков в вязких средах: в глицерине, расплаве припоя, не превышает 0,05 м/с, в то время как в водных растворах она равна 1,5–2,0 м/с. Микропотоки ускоряют процессы массообмена в диффузионном слое, особенно на границе расплав – твердое тело, а макропотоки – во всем объеме жидкой фазы.

Существенное влияние на увеличение скорости диффузии оказывает измельчение зерна припоев, подвергнутых воздействию ультразвука. Для бинарных сплавов типа Sn–Zn, Sn–Bi и других отмечено значительное уменьшение размеров зерна под действием ультразвука, которое в свою очередь зависит от температурного интервала кристаллизации. Измельчение первичных кристаллов в расплаве увеличивает коэффициент диффузии. Воздействие УЗ колебаний приводит также к усилению диффузионных процессов в твердой фазе, несмотря на отсутствие в ней кавитации и вторичных акустических эффектов. Под влиянием ультразвука происходит снижение энергии активации атомов жидкой фазы, проникновение их в поверхностные слои твердого тела по дислокациям, границам кристаллитов и зерен.

Если на диффундирующие частицы действует сила УЗ поля F , то под ее влиянием частицы вещества в жидкой среде будут двигаться со средней скоростью:

$$U = v \cdot F, \quad (8.22)$$

где v – подвижность частиц.

В этих условиях к потоку диффузии добавится поток частиц, движущихся под действием силы УЗ поля F , и тогда полный поток будет равен [17]:

$$J = -D' \frac{\partial C}{\partial x} + U \cdot C_1 \cos \beta, \quad (8.23)$$

где C_1 – концентрация подвижных частиц, β – угол между векторами силы УЗ поля и диффузионного потока.

Сила УЗ поля, действующая на поток частиц сечением S :

$$F = \rho c \cdot \omega A \cdot S. \quad (8.24)$$

Подставляя выражение (8.21) и (8.23) в (8.22) получим:

$$J = -D' \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + v \cdot \rho c \cdot \omega A \cdot S \cdot C_1 \cos \beta. \quad (8.25)$$

Воздействие низкочастотных импульсов электрического тока, пропускаемых через расплав с амплитудой, в 3–5 раз превосходящей амплитуду постоянного электрического тока начала электропереноса, стимулирует диффузию реакционно-активных компонентов в зоне активации. Одновременное воздействие интенсивной кавитации в припое и мощных импульсов тока усиливает направленную диффузию компонентов при формировании соединений. Обусловленный электропереносом суммарный поток ионов реакционно-активных компонентов равен:

$$J_{\text{эп}} = B_u \cdot \rho \cdot \frac{I_a}{\tau} \cdot C_u \cos \alpha, \quad (8.26)$$

где I_a – амплитуда импульсов тока, ρ – удельное электрическое сопротивление компонента, B_u – подвижность иона, τ – скважность импульсов тока, C_u – концентрация ионов реакционно-активного компонента в расплаве, α – угол между векторами электрического поля и диффузионного потока.

Суммарный поток частиц при совместной активации энергией УЗ и электрических полей равен:

$$J = -D' \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + B_u \cdot p \cdot \frac{I_a}{\tau} \cdot C_u \cos \alpha + \nu \cdot \rho c \cdot \varpi A \cdot S \cdot C_1 \cos \beta. \quad (8.27)$$

С учетом теплового эффекта при воздействии энергии активации на систему припой – паяемый материал суммарный поток частиц равен:

$$J = -D_0 e^{-\frac{E-\Delta E}{RT}} C^{T_0} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - (h/2)}{2\sqrt{D_0 \cdot e^{-\frac{E-\Delta E}{RT}} \cdot t}} \right) \right] + B_u p \frac{I_a}{\tau} C_u \cos \alpha + \nu \rho c \varpi A S C_1 \cos \beta. \quad (8.28)$$

Из уравнения (8.28) следует, что активация энергией УЗ поля приводит к росту коэффициента диффузии, а активация электрическим полем – к росту суммарного потока ионов реакционно-активных компонентов в зоне взаимодействия, а следовательно, и к увеличению скорости и глубины диффузии. Ускорение процессов диффузии реакционно-активных компонентов в соединении способствует увеличению переходной зоны на границе припой – материал и образованию химических соединений между компонентами припоя и материалами, что увеличивает механическую прочность, повышает качество паяных соединений и эксплуатационную надежность изделий.

Моделирование влияние УЗ и токовой активации на глубину диффузии припоя Sn-Zn в алюминиевый сплав АМц при следующих граничных условиях: площадь контактирования 10–50 мм², амплитуда колебаний 10–20 мкм, амплитуда импульсов тока 1–10 А, частота импульсов 1–10 Гц, граничная глубина диффузии 0–20 мкм, время диффузии 5–15 с, частота колебаний 22 кГц показало, что УЗ активация увеличивает концентрацию диффундирующего элемента на граничной глубине в среднем на 15–20%, а совместная УЗ и токовая активации – на 30–45% (рис. 8.8). С повышением частоты УЗ колебаний наблюдается прирост концентрации, так как при этом увеличивается количество энергии, поглощаемой материалом обрабатываемой детали.

Одновременная активация расплава энергией УЗ поля и мощными импульсами тока увеличивает тепловую энергию системы, что позволяет ускорить достижение температуры пайки, увеличить смачиваемость припоем поверхностей материалов и повысить тем самым производительность процесса.

Возникновение процесса электродиффузии обусловлено соотношением действующих на термически возбужденный ион металла сил, направленных навстречу электрическому потоку (действие приложенного внешнего поля), и по

направлению электронного потока. Вследствие экранирующего влияния электронов влияние электрического поля невелико, поэтому преобладающей является сила «электронного ветра», которая возрастает с увеличением плотности тока. В результате возбужденные ионы имеют большую вероятность перейти в вакансию по движению электронов, чем против движения. Таким образом, вакансии перемещаются к отрицательному полюсу, а ионы металла - к положительному, увеличивая тем самым ширину диффузионной зоны.

Практическая проверка совместного воздействия концентрированных потоков энергии УЗ и ЭМ полей на процессы формирования контактных соединений деталей из сплава АМц с использованием припоев ПОС 61 и ПОЦ 10 показала, что прочность соединений разнородных по химическому составу материалов повышается в 1,5–1,8 раза, а переходное электрическое сопротивление снижается в 2,0 – 2,5 раза.

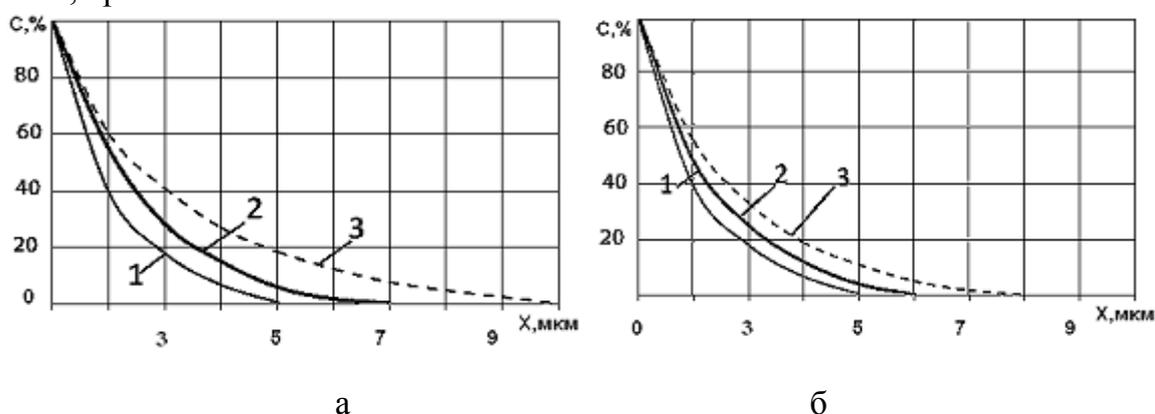


Рис. 8.8. Концентрационные профили диффузии: а – $A = 20$ мкм, б – $A = 10$ мкм, 1 – без активации, 2 – УЗ, 3 – УЗ + ток 10 А

Развитие кавитационного процесса в расплавленном припое, сопровождаемое динамическим и термическим эффектами, увеличивает химическую активность компонентов припоя и создает условия для протекания реакций химического взаимодействия припоя с паяемым неметаллическим материалом. Для образования прочного паяного соединения разнородных материалов, например керамических и стеклокерамических, необходимо протекание процессов физико-химического взаимодействия, результатом которых является образование переходной зоны, содержащей продукты реакции в виде стехиометрических соединений. Прочность связи обуславливается при этом валентными силами.

Исследование переходной зоны между припоем и неметаллическим материалом может быть проведено с помощью различных методов анализа, включая металлографический, оптический, рентгеноструктурный, микрорентгено-спектральный, электронно-микроскопический, которые имеют различную разрешающую способность в мкм и позволяют исследовать различные зоны металлизированных диэлектриков и переходную зону "металлизированный слой – материал".

Металлографические исследования позволяют получить данные о структуре

переходной зоны, выявить внутренние дефекты, наблюдать изменение цвета материала, прилегающего к припою, что может свидетельствовать об изменении состава и свойств переходной зоны. Большие преимущества при этом обеспечивают косые аншлифы участков спая, что дополнительно увеличивает разрешение в зоне наблюдения в 10 раз и более. Основной трудностью таких исследований является резкое различие в микротвердости соединяемых материалов. Так, в случае пьезокерамики на основе ВаТiОз это различие по сравнению с припоями достигает 25 раз.

Спектральный анализ дает возможность обнаружить в спектре неметаллического материала линии компонентов припоя, установив тем самым факт проникновения того или иного компонента припоя в основной материал или растворения материала в припое. Последовательным сошлифовыванием слоев металлизированного материала можно с точностью по толщине до 10 мкм определить размеры переходной зоны.

Идентификацию интерметаллидных и оксидных соединений, присутствующих в переходной зоне, можно с достаточной степенью точности осуществить с помощью фазового рентгеноструктурного анализа. Использование дифрактометров с остросфокусированным рентгеновским излучением повышает разрешающую способность метода до 40–50 мкм.

Микрорентгеноспектральный метод анализа обеспечивает возможность получения данных о микрохимической структуре переходной зоны и соединяемых материалов. Качественный анализ проводят методом сканирования электронного пучка на заданной поверхности, в результате чего может быть получена информация о распределении элементов, об однородности фаз, о морфологии их распределения.

Серийно выпускаемые приборы, сочетающие в себе растровый электронный микроскоп высокого разрешения и рентгеновский микроанализатор типов Камебакс (Франция), JSM-50А (Япония), ARL (США) имеют минимальный размер зонда (около 0,1 мкм). Разрешающая способность при исследовании на этих приборах при количественном анализе равна 2 мкм. Растровый электронный микроскоп Stereoskan-360 (Англия) с микроанализатором AN-10000 позволяет анализировать поверхности размером от 1 мкм² до 0,5 мм².

Наибольшей разрешающей способностью переходной зоны обладает метод электронной микроскопии, позволяющий исследовать тонкую микроструктуру переходной зоны с размером элементов, не превышающим долей микрометра. Для исследования спаев используют угольные или металлические реплики, воспроизводящие рельеф поверхности изучаемого объекта. Электронные микроскопы просвечивающего типа обеспечивают увеличение от 10 000 раз до– до 50 000 раз (Н-800, Япония).

Микрорентгеноспектральный анализ переходной зоны при металлизации пьезокерамики типа ТБК-3, ЦТБС-3 оловянно-цинковым припоем, содержащим 3–11% цинка, показал, что содержание Zn и Sn в пограничном слое керамики со-

ставляет 0,4–1%. Глубина переходной зоны, определенная с помощью радиоизотопного метода, составляет для керамики BaTiO_3 40 мкм, для керамики $(\text{Pb}_{0,60}\text{Ba}_{0,40})\text{Nb}_2\text{O}_6$ —10 мкм. Проникновение металла в пьезокерамику происходит за счет межкристаллитной диффузии. При анализе проб, взятых с поверхности керамики BaTiO_3 , обнаружен Ti, с ЦТС-19 – Ti и Zn. На границе раздела подложка – покрытие формируется переходная область с повышенной микротвердостью, обогащенная цинком, который при содержании 5–7 мас.% сконцентрирован вблизи подложки [18].

Рентгеноструктурный анализ показал наличие фазы Zn_2SiO_4 в системе ЦТБС–3 – припой и ZnTiO_4 в системе титановый сплав ВТ5-1 – припой на границе раздела подложка покрытие. Это подтверждает диффузионную подвижность и реакционную способность цинка в процессе УЗ металлизации пьезокерамических материалов. Образование химических соединений цинка с оксидами, входящими в состав керамики, обуславливает высокую прочность сцепления припоя, что создает предпосылки для замены процесса высокотемпературного вжигания серебра при формировании электродов к пьезокерамическим элементам металлизацией легкоплавкими припоями.

Исследованы структуры паяных соединений со стеклокерамическими материалами, в состав которых входило 20–30% стекла в виде группы оксидов SiO_2 , BaO , PbO , включая добавки оксидов Na_2O , K_2O , TiO_2 , а также керамические материалы Т-80, Т-150, Т-260 на основе оксидов SrTiO_2 , CaTiO_3 и TiO_2 . УЗ металлизацию стеклокерамических образцов вели при температуре $270 \pm 5^\circ\text{C}$, скорости 0,3 м/мин на частоте 44 ± 1 кГц и амплитуде УЗ колебаний 5–8 мкм припоем системы Pb-Sn-Zn-In с температурой плавления 180°C [19].

Металлографический анализ показал (рис. 8.9, а), что на границе припоя со стеклокерамикой наблюдается тонкая зона оксидных соединений, образовавшихся в пограничном слое припоя 1, примыкающем к поверхности стеклокерамики 3, а также отчетливо заметно смачивание частицами индия 2 поверхности стеклокерамики.

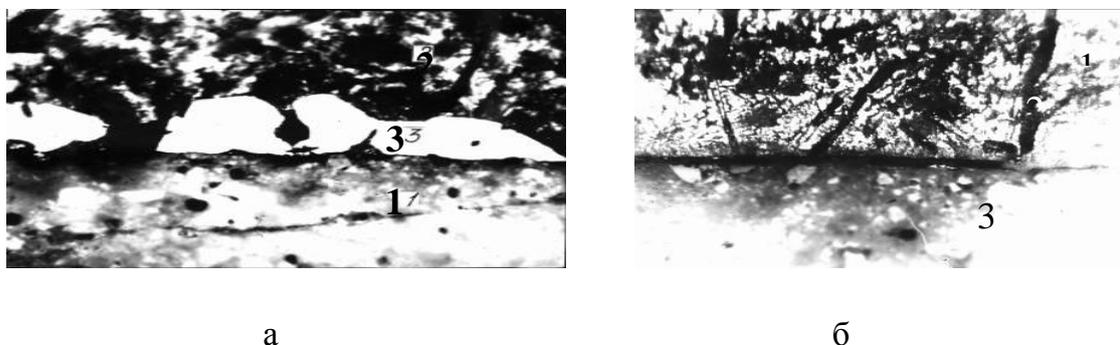


Рис. 8.9. Микроструктуры границы раздела стеклокерамики с припоями: Pb-Sn-Zn-In (а) и Sn-Zn (б).

Располагаясь вдоль ее поверхности, крупные зерна индия (светлые по виду)

смачивают ее поверхность и тем самым увеличивают прочность спая. Однако ярко выраженной зоны диффузии между припоем и стеклокерамикой, а также проникновения припоя вглубь стеклокерамики отмечено не было. Проникновение припоя по трещинам и другим микродефектам имело место в результате структурных несовершенств самой стеклокерамики либо нарушений технологии УЗ металлизации, например, при возникновении жесткого акустического контакта излучающего торца УЗ инструмента с поверхностью материала. При наличии макро- и микротрещин в приповерхностных слоях стеклокерамики припой под действием интенсивных кавитационных давлений заполняет микротрещины и микровпадины, повышая тем самым в некоторой степени прочность сцепления. Однако значительное проникновение припоя вглубь стеклокерамики существенно влияет на ее диэлектрические свойства.

Металлографические исследования зоны спая стеклокерамики с припоем системы Sn–Zn показали (рис. 8.9, б), что вдоль паяемой поверхности наблюдается ориентированное расположение кристаллов цинка 2 под различными углами к поверхности стеклокерамики 3. Отмечена также тонкая зона интерметаллидных соединений, образовавшихся в пограничном слое припоя 1, непосредственно примыкающем к поверхности стеклокерамики. При металлизации стеклокерамики припоем системы Pb–Sn–Zn–In происходят изменения и в ее микроструктуре, заключающиеся в увеличении стеклофазы в пограничной с припоем области, образовании стекловидных областей, располагающихся вблизи границы с припоем.

Анализ металлокерамического спая с целью определения состава стеклофазы в керамике, объемов стекла и пустот в зависимости от расстояния до межфазной границы металлизированной керамики на основе Al_2O_3 показал, что возле металлизированной зоны наблюдаются увеличение объема стеклофазы и уменьшение объема пустот. Основным компонентом стеклофазы является SiO_2 , содержание CaO и TiO_2 значительно уменьшается на расстояниях до 300 мкм от межфазной границы.

Рентгеноструктурный анализ спаев со стеклокерамикой, проведенный на дифрактометре ДРОН-2 с использованием излучения CuK_α , позволил выявить некоторые особенности механизма образования спая с материалами, богатыми аморфной фазой. Так, при анализе рентгенограмм исходного металлокерамического материала отмечены рефлексы, соответствующие двойным оксидами $2PbOSiO_2$ и $2BaOSiO_2$, а также уменьшенная интенсивность рефлексов оксида SiO_2 по сравнению с оксидами PbO и BaO. Это указывает на физико-химическое взаимодействие окислов, составляющих аморфную фазу стеклокерамики, в процессе спекания металлокерамической массы при 700–750°C. Анализ припоев в исходном состоянии, применяемых для УЗ металлизации, показал наличие в них оксидов цинка ZnO, образовавшихся в процессе приготовления припоя, а именно при растворении цинка в оловянно–свинцовом припое.

На рентгенограммах отмечены рефлексы, соответствующие сложным оксид-

ным соединениям $Pb_2ZnSi_2O_7$ и $BaZnSiO_4$, в то же время относительная интенсивность рефлексов двойных оксидов $2PbOSiO_2$ и $2BaOSiO_2$ уменьшена по сравнению с рентгенограммой исходного материала (рис. 8.10). Это подтверждает факт химического взаимодействия между компонентами припоя, а именно Zn, с одной стороны, и оксидами аморфной фазы стеклокерамики PbO и BaO – с другой. Исследование микроструктуры переходной зоны на растровом электронном микроскопе MINI-SEM с увеличением в 700 раз показало, размеры зоны сложных оксидных соединений, образовавшихся в припое вблизи границы со стеклокерамикой, не превышают 3 мкм.

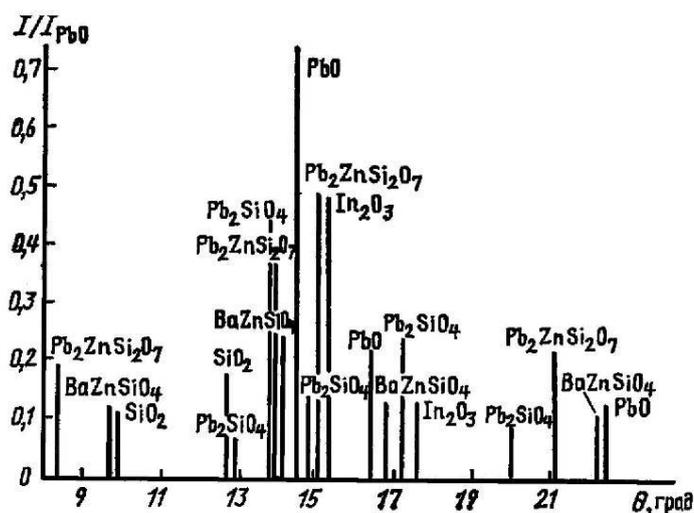


Рис. 8.10. Относительная интенсивность рентгеновских рефлексов оксидов аморфной фазы стеклокерамики и оксидных соединений

Направленная диффузия компонентов припоя или компонентов материалов соединения в припой за счет электромиграции частиц диффузионно-подвижных металлов при плотностях тока, больших $1-1,5 \text{ А/мм}^2$, приводит к увеличению ширины диффузионной зоны и прочности соединений. Прочность соединений припоем ПОС 61 с алюминиевыми образцами от величины постоянного тока на частоте 22 кГц, амплитуде 10 мкм, температуре 240°C , времени 10 увеличивается для значений тока, больших 5 А, и снижается при токах свыше 15 А. Причиной увеличения прочности является электрическая активация диффузии компонентов припоя в материал, которая связана с явлением электропереноса в расплавах при высоких плотностях тока.

При совместном воздействии УЗ колебаний и токовой активации прочность соединений (рис. 8.11) в случае параллельных колебаний выше на 10-15 МПа, чем при продольных. Максимальная прочность соединений наблюдалась при длительности воздействия параллельных УЗ колебаний 15–20 с и составляла 24 МПа. При большем времени прочности снижается за счет эрозии паяемого материала и окисления припоя.

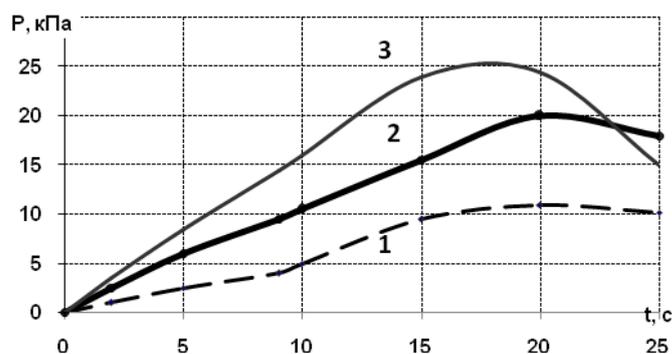
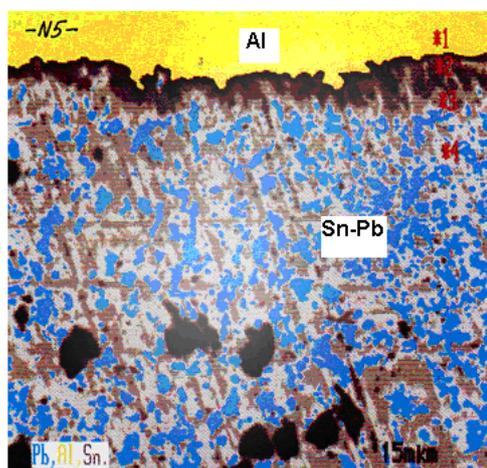


Рис. 8.11. Зависимости прочности соединений от времени и вида колебаний: 1 – продольные, 2 – продольные в электрическом поле, 3 – параллельные

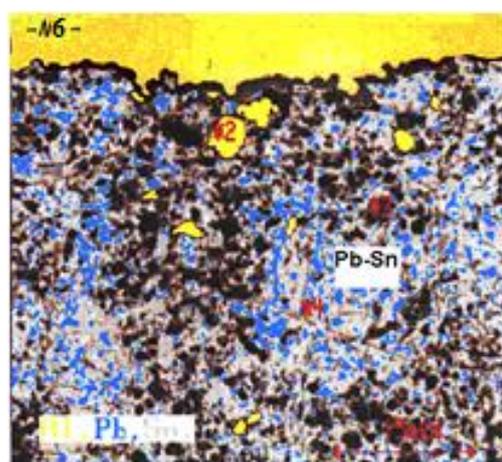
Пропускание тока через зону взаимодействия в направлении от припоя к основанию повышает прочность соединений в 1,5–1,8 раза за счет увеличения ширины диффузионной зоны из-за электромиграции алюминия в припой. Ширина диффузионной зоны, измеренная с помощью растрового электронного микроскопа, составляла около 4 мкм для припоев ПОЦ 10 и ПОС 61 [20].

При пропускании тока в обратном направлении прочность соединений практически не увеличилась, так как олово и свинец, составляющие припой, не обладают такой подвижностью, как алюминий. Ширина диффузионной зоны при этом была практически такой же и составляла около 2 мкм. Для припоя ПОЦ 10 диффузионная зона несколько больше из-за миграции электроподвижного цинка к границе алюминий-припой и далее вглубь алюминиевой детали, увеличивая ширину диффузионной зоны.

Структуры соединений, сформированных в УЗ поле (а) и при совместном действии УЗ и электрического поля (б), приведены на рис. 8.12. В первом случае наблюдается равномерное смачивание поверхности основного металла Al, однако заметного растворения Al не отмечено, а во втором случае – более глубокая диффузия алюминия в расплав Sn-Pb припоя, что сопровождается расширением переходной зоны на границе расплав–основной металл.



а



б

Рис. 8.12. Микроструктуры паяных соединений с алюминием

Входящие в расплавы припоев на оловянной основе добавки металлов: цинка, алюминия, бериллия, титана и др., имеют сильное сродство по отношению к кислороду и образуют оксиды R. При УЗ активации расплава эти оксиды образуют устойчивые химические соединения с оксидами O, находящимися на поверхности металлов, стекла, керамики (рис. 8.13) [21]. Таким образом, паяное соединение формируется между разнородными по химическому составу материалами без применения флюса.

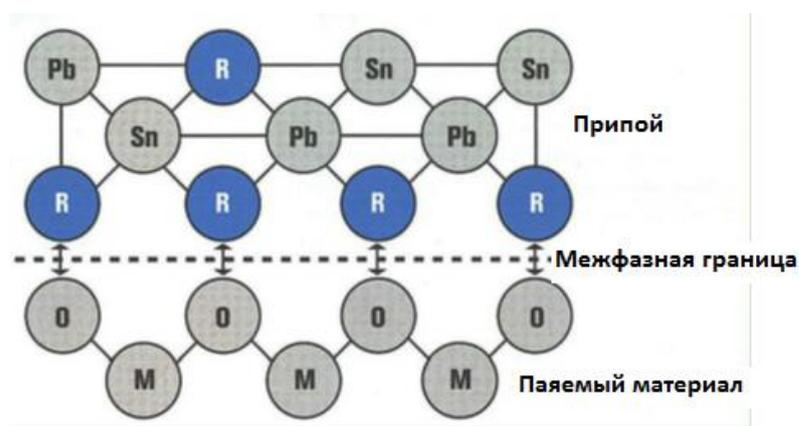


Рис. 8.13. Образование химических связей на межфазной границе

8.1.4. Технологическое оснащение ультразвуковой пайки

Как показали исследования процесса УЗ пайки, интенсивность кавитации увеличивается в низкочастотной области спектра УЗ колебаний. С повышением частоты колебаний интенсивность кавитации в расплаве снижается, одновременно возрастают электромагнитные и магнитомеханические потери в преобразователях ультразвука. Уход частоты в область слышимых звуков повышает уровень шума, усложняет звукоизоляцию установок. Оптимальный частотный диапазон работы УЗ технологических установок 18–44 кГц. К факторам, обуславливающим эффективность ультразвуковой кавитации, в первую очередь относится мощность УЗ излучения, вводимого в расплав припоя, которая должна быть в пределах 100 Вт, и точная настройка УЗ инструмента на его собственную частоту. Время пайки или лужения составляет 5–10 с, скорость перемещения излучателя паяльника – $(0,8–1,6) \cdot 10^{-2}$ м/с, а оптимальная величина зазора между торцом излучателя и паяемой поверхностью – 0,2–3,0 мм. Необходимость постоянного поддержания этого зазора вызвана стремлением исключить образование макро- и микротрещин в поверхностных слоях хрупких неметаллических материалов за счет динамического фактора ультразвука, особенно в результате возникновения жесткого акустического контакта излучателя с обрабатываемой поверхностью.

Промышленностью в 80 годы выпускались УЗ паяльники УЗП2–0,025 и ванны лужения УЗВЛ–0,4; УЗВЛ–1, источником УЗ энергии для которых служит генератор типа УЗГ3–0,4 с максимальной выходной мощностью 400 Вт. Характеристики УЗ технологического оснащения в сравнении с ранее выпускавшимися моделями [22] приведены в табл. 8.2, характеристики УЗ генераторов – в табл. 8.3. В процессе практического использования паяльников типа УЗП2–0,025 (рис. 8.14) выявлены такие их недостатки, как нестабильность работы, неэффективность воздушного охлаждения, малая мощность нагревателя, низкая производительность ручного труда.

Таблица 8.2 Технологическое оснащение УЗ пайки и металлизации

Модель	Частота, кГц	Мощность, Вт		Габаритные размеры, мм
		нагревателя	потребляемая	
Паяльники и паяльные станции				
УЗУП-2	23—28	70—120	110—160	280x40x150
УЗП2-0,025	44±4	36	60	255x57x152
УЗУ-9П	44±4	36	60	170x310x168
Ванны				
УП-40	22	1000	1500	430x360x220
УЗВА-1	18-25	300	800	360x360x480
УЗУЛ-1М	23-25	300	500	200x300x250
УЗВЛ-1-0,4/22	18-25	300	800	360x360x480
УВЛ-4	18	1000	1300	309x367x360

Ваннам лужения УЗВЛ–0,4 присущи следующие недостатки: низкая интенсивность колебаний, что приводит к наличию необлуженных мест; ограниченные размеры рабочей поверхности припоя; загрязнение ванны шлаками; наличие водяного охлаждения преобразователя.

Таблица 8.3. Ультразвуковые генераторы

Тип	Конструктивное исполнение, нагрузка	Мощность, кВт	Частота, кГц	Цена, (у.е)
УЗГ1-0,063/22	АПЧ,ПП	0,063	22	95
УЗГ2-0,063	АПЧ,ИА,ПП			150
УЗГ13-0,1/22	АПЧ,АСА,ИА,ПРМ,ПП	0,1		275
УЗГ14-0,16/22	АПЧ,ИА,СРМ,ПП			200
УЗГ7-0,25/22		0,25		675
УЗГ7-0,4/44	АПЧ,АСА,ИА,ПРМ, ВПО,МП,ИП	0,4		1500
УЗГ8-0,4/22	АПЧ,ИА,СРМ,МП,ИП			665
УЗГ3-1,0/22		0,1		1200
УЗГ15-1,6/22	АПЧ,АСА,ИА,ПРМ,ВПО, МП,ИП	1,6		2000

УЗГ16-1,6/22М	АПЧ,ИА,СРМ,ВПО,МП,И П			1400
УЗГ16-1,6/22П	АПЧ,ИА,СРМ,ВПО,ПП			1300
УЗГ5-4,0/16	ИА,СРМ,ВПО,МП,ИП	4,0	16	4000
УЗГ4-25,0/16	ВО,ВПО,МП,ИП	25,0		11000

АПЧ–автоматическая подстройка частоты, АСА–автоматическая стабилизация амплитуды, ИА–индикатор амплитуды, ПРМ–плавная регулировка мощности, СРМ–ступенчатая регулировка мощности, ВО – водяное охлаждение, ВПО–воздушное принудительное охлаждение, ПП– пьезокерамический преобразователь, МП–магнитострикционный преобразователь, ИП – источник тока подмагничивания



Рис. 8.14. Ультразвуковая установка УЗУ-9П

Мощность нагревателя увеличивают с помощью газовой горелки, расположенной в корпусе УЗ паяльника и выступающей над торцом волновода, что дает возможность производить пайку среднеплавкими и припоями.

Генерирование колебаний УЗ частоты в технологических установках, предназначенных для пайки, может осуществляться магнитострикционными, пьезокерамическими или ферритовыми преобразователями. Для использования в процессах УЗ пайки и лужения преобразователи встраиваются в ванны и паяльники, излучающие поверхности которых изготавливаются из кавитационно-стойких материалов (нержавеющие стали, титановые сплавы). Электрическая мощность промышленных установок для УЗ пайки не превышает 2,5 кВт.

Компанией "Ультразвуковая техника - ИНЛАБ" (СПб) производится широкополосный УЗ генератор, работающий в диапазоне от 15 кГц до 10 МГц и предназначенный для питания пьезокерамических преобразователей или для использования в качестве источника электрического сигнала заданной частоты и напряжения. При добавлении внешнего дополнительного источника тока поляризации генератор может быть использован для питания магнитострикционных преобразователей. Во время работы генератор индицирует текущее значение рабочей частоты, уровень выходного напряжения и уровень выходного тока (рис. 8.15).



Рис. 8.15. Широкополосный УЗ генератор технологического назначения

Применяются два основных способа УЗ пайки: с возбуждением всей массы припоя в ванне (рис. 8.16) и с локальным воздействием ультразвука на ограниченный объем припоя (рис. 8.17). В первом способе деталь погружается в ванну жидкого припоя, корпус которой жестко связан с волноводом или концентратором и преобразователем, охлаждаемым проточной водой.

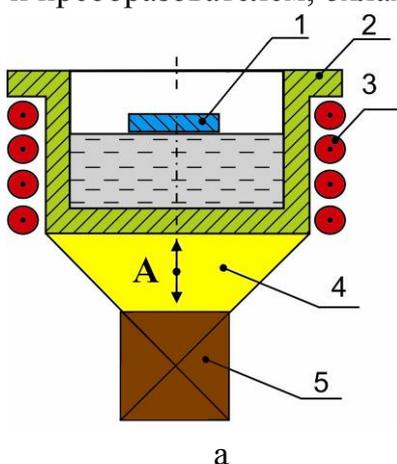


Рис. 8.16. УЗ ванна с возбуждением всей массы припоя: схема (а) 1 – деталь, 2 – ванна, 3 – нагреватель, 4 – излучатель, 5 – преобразователь, общий вид (б)

При втором способе изделие погружается в ванну жидкого припоя. При этом источники ультразвука не соединяются с ванной, а посредством волноводов подают УЗ энергию непосредственно в области, подверженные металлизации. В обеих конструкциях ванн расплавление припоя осуществляется нагревателем.

Первый способ обеспечивает возможность обработки мало- и среднегабаритных деталей или одновременно партии деталей. Однако при этом не всегда удастся получить необходимую интенсивность УЗ воздействия по всей паяемой поверхности. Второй способ позволяет паять и крупногабаритные изделия. Достоинством способа является возможность концентрации УЗ энергии в необходимых областях при достаточно высокой степени равномерности ее распределения,

недостатком— снижение ресурса работы излучателей ввиду их кавитационной эрозии.

Мощность нагревателя увеличивают с помощью газовой горелки, расположенной в корпусе УЗ паяльника и выступающей над торцом волновода, что дает возможность производить пайку среднеплавкими и припоями.

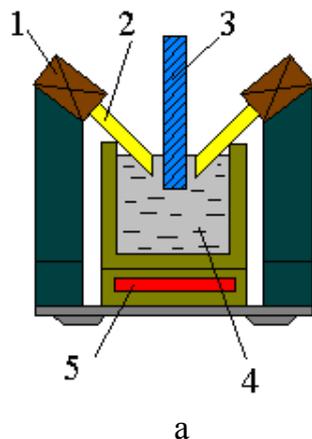


Рис. 8.17. Схема локального ввода ультразвука в расплав (а) и установка УЗ пайки (б): 1– преобразователь, 2–волновод, 3–деталь, 4– расплав, 5 – нагреватель

Перспективным направлением является использование в технологических устройствах пьезоэлектрических преобразователей, собранных в пакеты. Это позволяет получить более высокий к. п. д. преобразования, стабильный при рабочих температурах до 330°C, повысить интенсивность УЗ колебаний в рабочей зоне, использовать колебания различных частот для интенсификации процессов низкотемпературной пайки. Наибольшую эффективность и равномерность распределения УЗ поля обеспечивают УЗ ванны с круглым и фасонным профилем дна (рис. 8.18). Такие ванны позволяют применить большое количество преобразователей (до 48 шт.) и равномерное распределение интенсивности УЗ энергии, что способствует однородному и равномерному развитию кавитации по сравнению с обычными ваннами, и следовательно, повышает производительность процесса и качество лужения изделия [23]. Сотовая паяльная ванна состоит из двух преобразователей 1 и большого количества (до 25 шт.) маленьких паяльных тиглей 2 емкостью 200–250 мл. УЗ колебания передаются к днищам тиглей по гибким волноводам 3 (рис. 8.17, в), что обеспечивает пайку и лужение малогабаритных деталей [24].

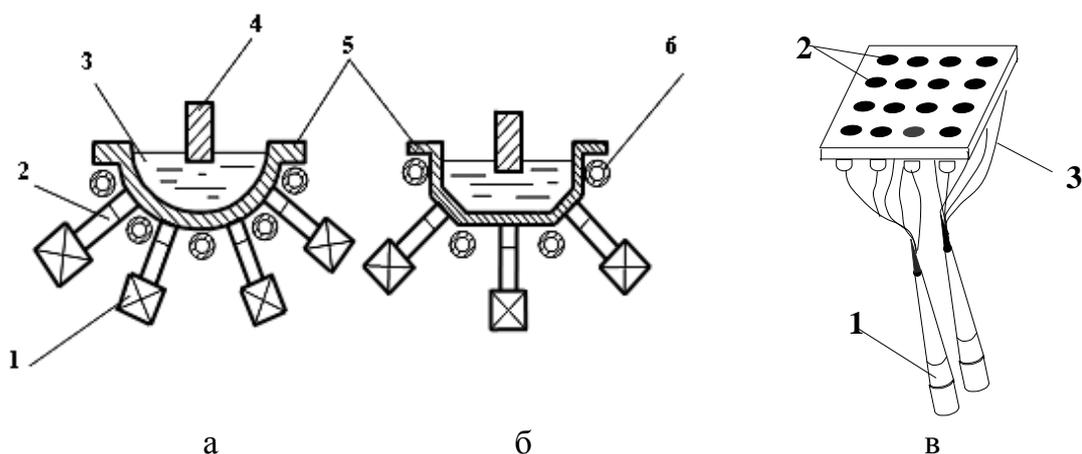


Рис. 8.18. УЗ ванны лужения с круглым (а), фасонным (б) профилем дна и для пайки и лужения миниатюрных изделий (в): 1 – преобразователь; 2 – волновод. 3 – паяльные тигли, 4 – изделие, 5 – корпус, 6 – нагреватель

В процессе УЗ активации расплавленный припой подвергается повышенному окислению, в результате чего на его поверхности образуется пленка оксидов, препятствующая лужению. Удаление пленки механическими скребками снижает производительность лужения и увеличивает расход припоя. Для уменьшения окисления припоя в ванне ее герметизируют уплотнением с образованием окна в рабочей зоне лужения, куда припой подается в момент лужения, либо подают инертный или восстановительный газ на поверхность припоя. Помещением УЗ волновода и ванны с припоем в герметичный корпус, куда через специальный ввод подается инертный газ, достигают полной защиты расплавленного припоя от окисления и высокого качества лужения. Время воздействия УЗ колебаний на расплав припоя выбирают не более 2 с.

Для УЗ лужения выводов радиоэлементов и микросхем разработано устройство (рис. 8.19), которое содержит магнитострикционный преобразователь 1, акустический трансформатор упругих колебаний 2, волновод 3, излучающую пластину 4, ванну с расплавленным припоем 5 [25]. Излучающая пластина выполнена из материала с высокой акустической добротностью, например титанового сплава ВТ-5, и имеет два участка, соединенных плавным изгибом. В верхнем более коротком участке выполнено отверстие, по диаметру рабочего торца волновода, который жестко присоединяется в этом месте к излучающей пластине пайкой тугоплавким припоем, например ПСр45. Нижняя основная часть излучающей пластины погружается в расплавленный припой. Глубина погружения соответствует длине обслуживаемых выводов компонентов.

Преобразователь 1 находится в герметичном металлическом кожухе 6, который крепится к акустическому трансформатору упругих колебаний в узле колебаний и в процессе работы охлаждается проточной водой. С помощью держателя 7 УЗ колебательная система перемещается вертикально по стойке 8, обеспечивая при наладке требуемую глубину погружения пластины. Длина излучающей пластины не должна превышать $\lambda/8$, так как при этом условии распределе-

ние амплитуд колебаний имеет равномерный характер. При размерах пластины, меньших $\lambda/8$, затрудняется одновременное лужение многовыводных электронных компонентов.

В том случае, если размеры превышают $\lambda/8$ и достигают $\lambda/4$, характер распределения амплитуд колебаний вдоль пластины будет иметь вид стоячей волны с узлами и пучностями колебаний, что ухудшит качество лужения. В результате локального введения УЗ колебаний в ограниченный объем припоя в ванне уменьшается его окисление, повышается качество лужения, снижается потребляемая мощность. Устройство УЗ лужения использовалось для лужения выводов радиоэлементов, резисторных сборок типа Б20 и микросхем в корпусе DIP, которых утратили паяемость в результате длительного складского хранения.

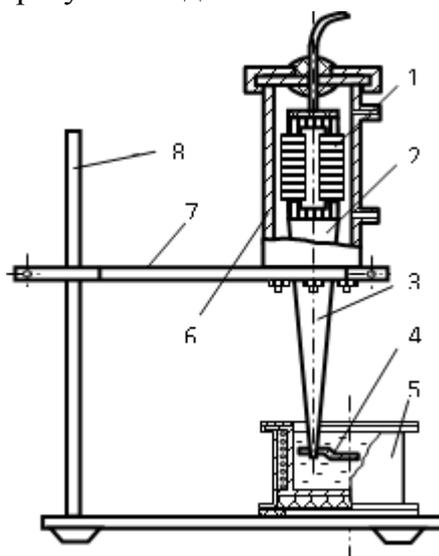


Рис. 8.18. Схема устройства УЗ локального лужения

Для УЗ металлизации пьезокерамических преобразователей разработана полуавтоматическая установка УЗУН-1 [26], которая позволяет наносить покрытия на поверхность размером до 500 мм (рис. 8.19) и состоит из генератора типа УЗГ5-1,6/22 мощностью 4 кВт, подвижной акустической системы, станка, а также пульта управления и сигнализации. В установке реализована схема механического сканирования УЗ колебательной системой металлируемой поверхности в продольном и поперечном направлениях со скоростью 1–50 мм/с. Колебательная система содержит устройство автоматического поддержания резонансной частоты. В установке предусмотрена возможность нанесения покрытий в диапазоне температур 200–500°C.

Для пайки плат печатного монтажа волной припоя с применением ультразвука разработана установка, позволяющая возбуждать в волне припоя УЗ колебания амплитудой до 20 мкм и направлять их перпендикулярно плоскости плат.

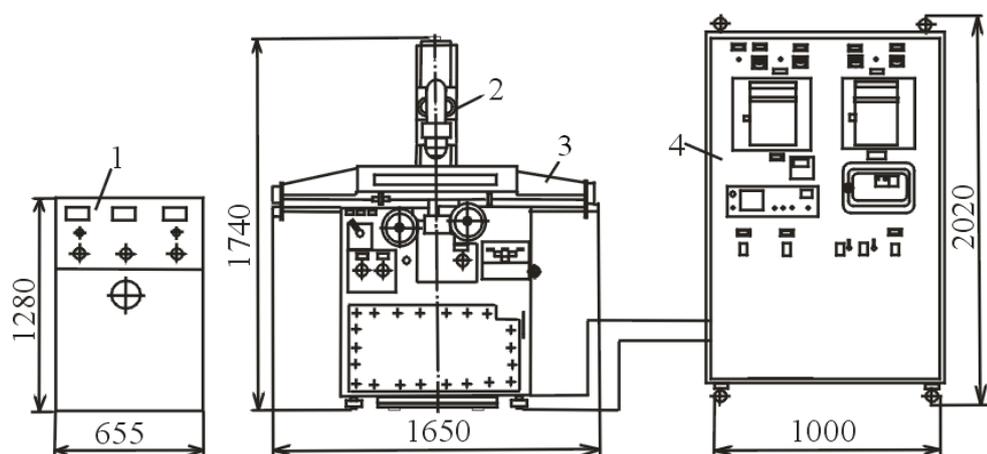


Рис. 8.19. Установка УЗ металлизации УЗУН: 1– генератор, 2– подвижная акустическая система, 3– станок, 4– пульт управления и сигнализации

В этой установке конструктивно «развязаны» акустическая система и устройство создания волны припоя, а также обеспечиваются регулировка ширины волны припоя в широких пределах, подача на волну припоя защитной пленки жидкости, предохраняющей его от окисления, и измерение амплитуды колебаний излучателей непосредственно в процессе пайки (рис. 8.20) [27]. Скорость смачивания плат при температуре припоя 250°C уменьшается с увеличением расстояния от платы до излучателя, что объясняется поглощением УЗ колебаний расплавом припоя. Условия пайки оптимальны при расстоянии от излучателя не более 1 мм и амплитуде смещений 10 мкм.

Наложение УЗ колебаний в процессе пайки с флюсом позволяет увеличить скорость смачивания в 1,5–2 раза. Повышение активности флюса происходит только в период действия ультразвука. Этот способ активации волны припоя УЗ колебаниями дает незначительные преимущества при больших энергетических затратах. Так как в настоящее время медные поверхности печатных плат покрываются легкопаяемыми покрытиями и используются водорастворимые флюсы, отличающиеся большей активностью, чем спиртоканифольный, применение способа ограничено.

УЗ лужение можно осуществлять созданием волны припоя высотой до 5 мм в расплаве при интенсивности колебаний до $35 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$, которая достигается за счет последовательного соединения пьезоэлектрических преобразователей и двух акустических трансформаторов скорости. Этим способом проводилось лужение окисленных медных поверхностей печатных плат, что позволило облуживать до 80% площади плат, находящихся в области воздействия ультразвука.

УЗ лужение и пайка применяются в технологических операциях сборки полупроводниковых приборов, например при посадке кристалла в корпус. Обычная флюсовая пайка вследствие трудности удаления остатков флюса ухудшает электрические параметры приборов, в результате чего брак составляет до 12%.

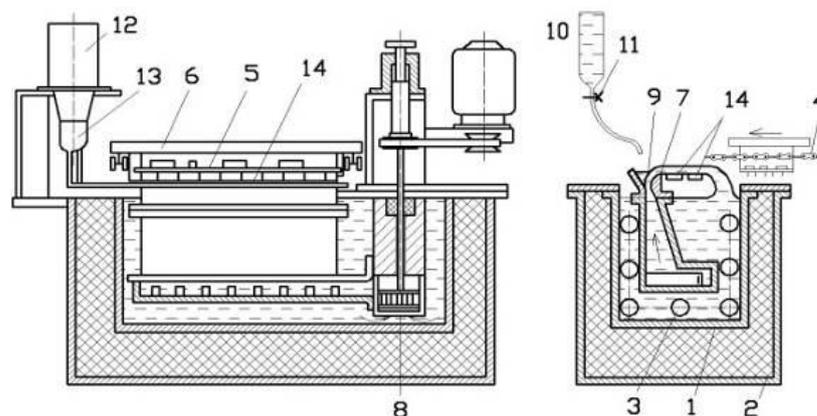


Рис. 8.20. Установка УЗ пайки плат волной припоя: 1 – ванна, 2– теплоизолирующая камера, 3 – нагреватель, 4 – транспортер, 5 – плата, 6 – приспособление для пайки, 7– сопло, 8 – насос, 9 – паз для защитной жидкости, 10 – емкость, 11– кран, 12 – УЗ преобразователь, 13 – концентратор 14 – волновод

Разработана установка УЗ лужения мест под напайку кристаллов полупроводниковых приборов средней и большой мощности, в которой припой переносится из ванночки на облуживаемый участок изделия с помощью наконечника инструмента за счет сил поверхностного натяжения. Лужение проводится в импульсном режиме в течение 1,5 с при мощности, подводимой к преобразователю, 140 Вт. Пайка кристаллов происходит сразу же после облуживания. Отрицательного влияния ультразвука на параметры приборов не обнаружено [28].

Бесфлюсовую пайку и лужение изделий из алюминия и его сплавов осуществляют с использованием УЗ колебаний в режиме бегущей волны при постоянной амплитуде и переменной частоте. С целью повышения производительности процесса и улучшения качества лужения частоту изменяют в пределах от $f_{min}=4c/\lambda n$ до $f_{max} = 4c/\lambda$, где c — скорость распространения УЗ волны в материале; λ — длина волны; n — целое нечетное число. При создании режима бегущей волны не возникает узлов и пучностей амплитуд смещений вдоль паяемой поверхности, что улучшает равномерность смачивания поверхности изделия по всей ее площади [29]. В схеме УЗ бесфлюсовой пайки плат к основанию корпуса микросборки (рис. 8.21) корпус 3 устанавливался между двумя УЗ системами, расположенными соосно друг против друга. Для надежной передачи энергии ультразвука корпусу волноводы 2 обеих систем были прижаты к нему с усилием 100–150 Н. Напряжение с генератора УЗГЗ–0,4 поступало на обмотки магнито-стрикционных преобразователей 1, соединенные последовательно.

Преобразователи настраивались на резонансную частоту 21,3 кГц за счет применения параллельной схемы компенсации их реактивного сопротивления. Корпус нагревался инфракрасным излучением от двух кварцевых галогенных ламп КИ–220–1000 5, закрепленных в диффузных отражателях. В процессе пай-

ки к плате 4 прикладывалось внешнее статическое давление величиной 1–5 Н, создаваемое подпружиненными штырьками в четырех точках платы.

Степень смачиваемости, как отношение площади платы, покрытой припоем, $S_{\text{ПР}}$ к исходной S_0 , зависит от факторов УЗ воздействия (амплитуды и частоты колебаний, времени воздействия ультразвука) и технологических (температуры пайки, усилия прижима плат к корпусу, толщины прокладки дозированного припоя). Хорошее смачивание для всех типов покрытий и припоев достигается при амплитуде УЗ вибраций, равной 10–15 мкм, что соответствует выходному напряжению генератора 50–55 В и току подмагничивания 2 А. При амплитуде более 20 мкм возможно распыление припоя в местах пучностей колебаний и загрязнение им поверхности плат.

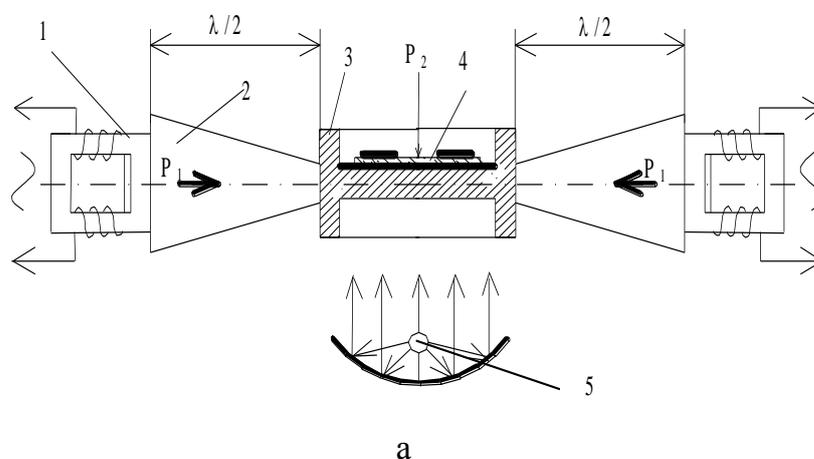


Рис. 8.21. Схема (а) и установка (б) УЗ бесфлюсовой пайки подложек ГИС

Эффект подъёма припоя по излучающей поверхности волновода использован при разработке устройства для УЗ лужения стеклокерамических конденсаторов без их погружения в расплав припоя. Устройство (рис. 8.22) [30] содержит две УЗ колебательные системы, состоящие из магнитоэлектрических преобразователей 1, акустических трансформаторов упругих колебаний 2, волноводов 3, рабочие концы которых имеют Г-образную форму и опущены в ванну 4 с расплавом

ленным припоем 5. Колебательные системы установлены на основаниях, имеющих возможность точного горизонтального перемещения. Для расплавления припоя и поддержания необходимой температуры пайки использован резистивный нагреватель 6. Г-образные концы волноводов колеблются в полуволновом резонансе, что приводит к появлению двух пучностей и узла колебаний.

При возникновении силы смачивания в УЗ поле расплав припоя поднимается на высоту H по колеблющейся поверхности волновода, определить которую можно исходя из условия равновесия капиллярного давления мениска припоя под действием УЗ колебаний и давления столба припоя [31]:

$$H = \frac{2\Delta\sigma_{1,2} \cos\theta}{\rho \cdot g \cdot a}, \quad (8.29)$$

где σ_{12} – поверхностное натяжение припоя, a – ширина зазора, ρ – плотность припоя, g – ускорение сил свободного падения.

Таким образом, зона верхней пучности, расположенная выше уровня припоя в ванне, является рабочей, чем и обеспечивается возможность автоматизации процесса лужения конденсаторов 7.

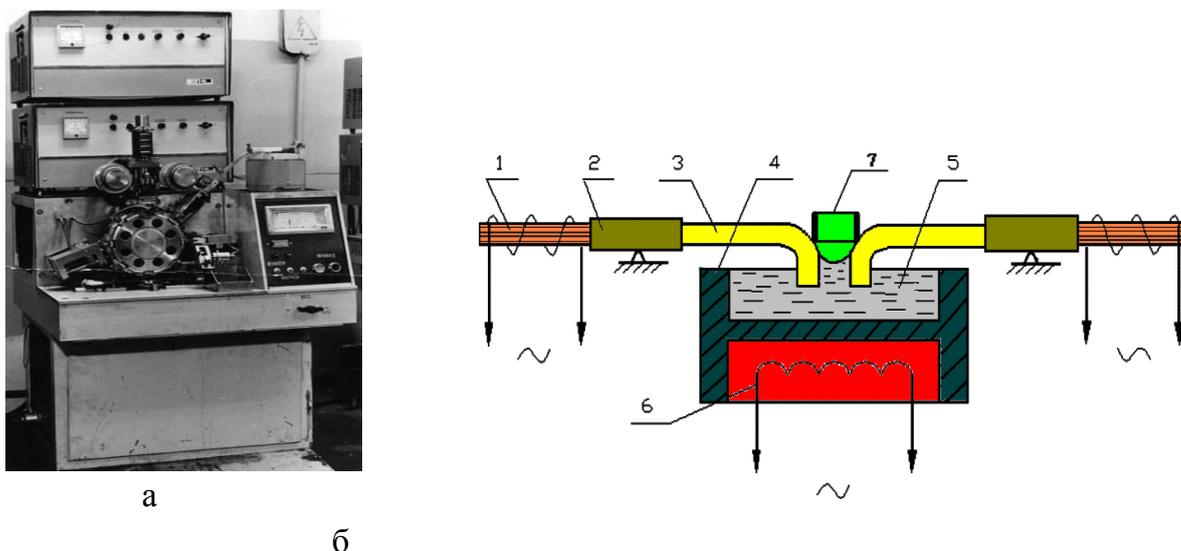


Рис. 8.22. Схема (а) и автомат (б) УЗ лужения стеклокерамических конденсаторов

Заготовки стеклокерамических конденсаторов с электродами из алюминиевой фольги подаются в зону лужения с помощью ротора с зажимами со скоростью 5–100 мм/с. Источниками УЗ колебаний являются 2 генератора типа УЗГЗ–0,4. В акустических системах устройства применены магнестрикционные преобразователи с резонансной частотой 44 ± 1 кГц. Лужение осуществляется припоем ПЗ00К Sn–15%, Zn–65%, Cd–20% при температуре припоя 430–470°C, напряжении на выходе генератора 20–30 В, скорости 40–60 мм/с. Внедрение автомата позволило полностью механизировать операцию лужения и обеспечить высокий процент выхода годных изделий [32].

Исходя из потребностей производства компания MBR Electronics предлагает различные УЗ паяльные станции: USS-9200, USS-9500, USS-1904 (рис. 8.23). Паяльные станции USS-9200 и USS-9500 предназначены для небольших производств и исследовательских лабораторий. В комплекте станций имеется цифровой блок управления на микропроцессоре, УЗ паяльник, а также приспособления для разогрева и монтажа. Достоинствами станций являются их небольшие габаритные размеры, автоматическая подстройка на резонансную частоту и автоматическая система поддержания температуры. Для крупносерийного производства предназначена паяльная станция USS-1904, которая имеет габариты, позволяющие использовать ее в стойках автоматических линий. Для УЗ лужения и пайки элементов различной конфигурации и размеров компания Advanced Sonic Processing Systems (США) предлагает широкий набор УЗ паяльных ванн.



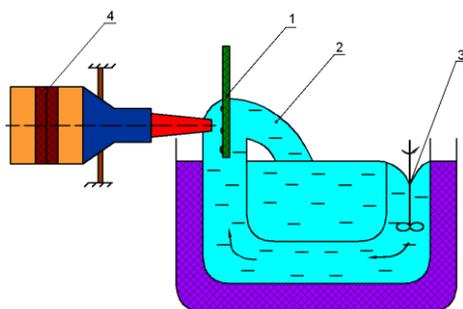
а



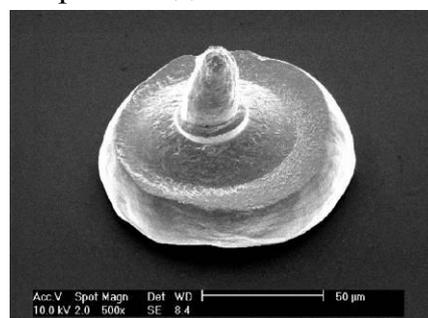
б

Рис. 8.23. УЗ паяльные станции: USS-9200 (а) и USS-1904 (б)

УЗ энергию вводят в волну припоя для формирования припойных столбиков на кремниевых чипах, носителях чипов и печатных платах [33]. Для получения припойных столбиков компонент закрывается фоторезистивной маской, которая служит также и формой для припоя. Кремниевая пластина 1 погружается в волну припоя 2, создаваемую мотором 3, при температуре 220–240°C. УЗ колебания частотой $16,5 \pm 2$ кГц от преобразователя 4 вводятся в волну припоя (рис.8.24). Одновременно в эту область подается азот со скоростью до 5 л/мин.



а



б

Рис. 8.24. Схема формирования (а) припойных столбиков (б) на пластине

Используя лазерное излучение, УЗ колебания могут быть введены в жидкую среду бесконтактным методом. Так, для расплавления шариков припоя диамет-

ром 1 мм на медных контактных площадках печатной платы применен ИАГ лазер мощностью 14 Вт. Лазерный луч модулировался частотой 20 кГц и фокусировался диаметром 0,7 мм на шарике припоя (рис. 8.25).

Расплавление припоя и смачивание поверхности контактной площадки происходило при остаточном давлении кислорода 8 Па в результате УЗ вибраций амплитудой 0,6 мкм, возбуждаемых в припое в течение 250–300 мкс [34]. В результате УЗ активации припой растекался по контактной площадке с углом смачивания 25°. Новый метод бесфлюсовой УЗ пайки модулированным лазерным излучением может быть перспективен для сборки электронных модулей с высокой плотностью монтажа.

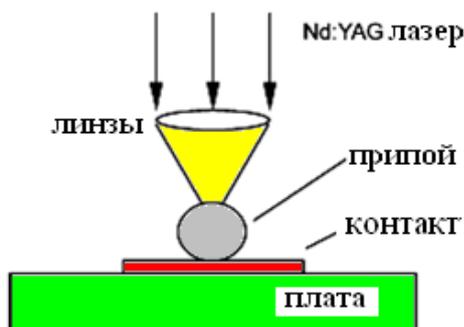


Рис. 8.25. Воздействие модулированного лазерного луча на смачивание припоем контактной площадки

8.1.5. Влияние параметров ультразвуковых процессов на свойства соединений

Амплитуда УЗ колебаний $3 \pm 0,5$ мкм является пороговой для кавитационных процессов в расплаве, ниже которой отсутствует смачивание и адгезия припоя к поверхности материала и химическое взаимодействие между ними. При амплитуде более 15 мкм прочность снижается, поскольку возникающие динамические импульсы вызывают деградацию приповерхностных слоев расплава припоя и его интенсивное окисление. При продольных колебаниях значительная часть энергии передается в материал, вызывая его нагрев и разрушение, а при параллельных в большей степени распространяется в припое вдоль паяемой поверхности и расходуется на кавитационные явления. Дополнительно улучшается процесс смачивания материала припоем за счет эффекта натирания.

Прочность паяных соединений с алюминиевыми сплавами при параллельном направлении колебаний выше на 10–12 МПа, чем при продольном, вне зависимости от времени воздействия (рис. 8.26). Высокая прочность соединений достигается при длительности воздействия колебаний 15–20 с. При меньшем времени вследствие неполного разрушения поверхностных пленок смачивание поверхности материала недостаточное. При большем времени происходит уменьшение прочности паяного соединения за счет эрозии основного материала и окисления

припоя. Максимальная прочность паяных соединений соответствует амплитуде параллельных УЗ колебаний 10–12 мкм при времени 15 ± 1 с [35].

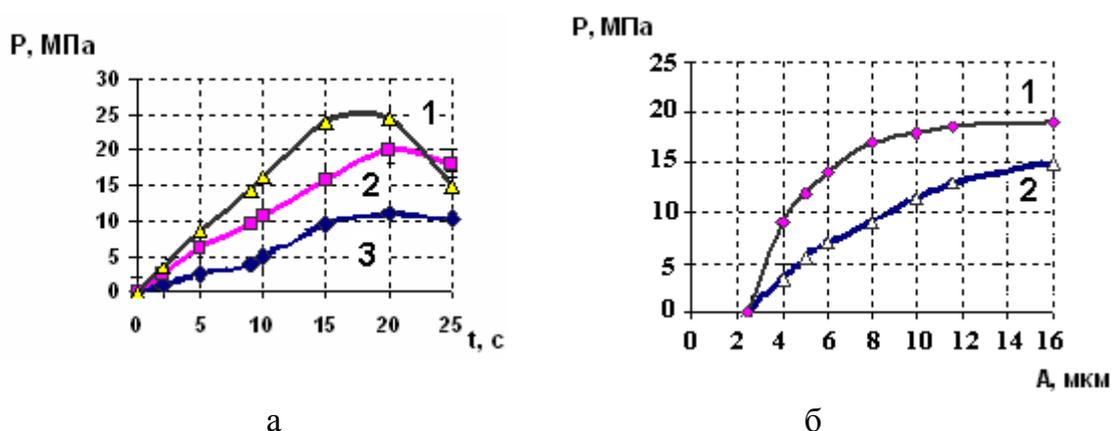


Рис. 8.26. Зависимости прочности паяных соединений от времени (а), амплитуды и вида колебаний (б): 1– параллельные, 2– продольные, 3– крутильные

Механическая прочность паяных соединений зависит от состава припоя (табл. 8.4) [36].

Таблица 8.4. Механическая прочность паяных соединений

Припой	Состав, %	Температура пайки, °С	Прочность, МПа
ПОС 61	Sn-61, Pb-37	230-250	0,25–0,5
ПСрОС-3-58	Sn-59, Ag-2	220-240	3,0–5,0
ПОССу 10-2	Sn-10, Sb-2, Pb-88	268-285	5,0–7,0
П150А	Sn-38, Zn-4, Cd-58	180-190	4,0–6,0
ПОЦ 10	Sn-90, Zn-10	220–225	8,0–10,0
ПОЦ 20	Sn-80, Zn-20	240-250	10,0–15,0
Специальный	Sn-78, Zn-10, In-10, Sb-2	220-230	18,0–20,0

Исследованы зависимости прочности соединений с поверхностью ферритового материала от времени и температуры процесса (рис. 8.27).

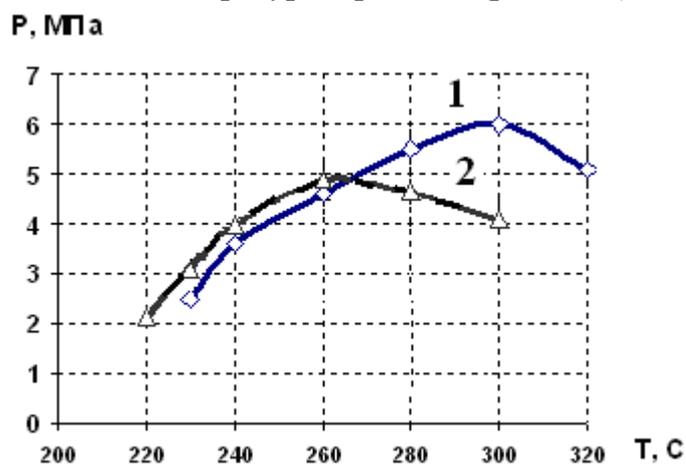


Рис. 8.27. Зависимости прочности соединений от температуры для припоев: 1 – ПОЦ 10, 2 – ПОС 61

При малом времени УЗ обработки (5-10 с) прочность соединений не высокая, так как не успевают протекать процессы физико-химического взаимодействия компонентов припоя с оксидами на поверхности феррита. Максимальная прочность для припоя ПОЦ 10 достигнута при длительности обработки 15-20 с. С увеличением времени обработки прочность снижается по причине развития усталостных процессов в самом феррите.

Оптimalен интервал температур 280–300°C, когда прочность соединений составляет 5–6 МПа. Увеличение температуры свыше 300°C приводит к снижению прочности вследствие окисления припоя. При УЗ пайке алюминия припоем Sn-Pb в среде аргона в течение 4 с наибольшая прочность соединений достигается для образцов, химически очищенных перед пайкой в щелочном растворе. Несколько меньшую прочность имели образцы с покрытием оловом [37].

Фундаментальные исследования процесса УЗ пайки для изделий электроники проведены в Sandia National Laboratories (США) Р.Т. Vianco и др. [38]. Исследованы процессы смачивания при локальном воздействии УЗ колебаний и высота проникновения расплава в капиллярный зазор (рис. 8.28). Получены зависимости степени смачивания медных образцов от мощности УЗ времени и глубины проникновения припоя от величины зазора А (рис. 8.29). При увеличении времени и температура процесса, различие в области смачивания на передней и задней поверхностях уменьшалось. Качественная оценка эрозии поверхности показала, что при длительном времени и высокой температуре размер и глубина эрозии на передней поверхности увеличивались. Эрозия задней поверхности во всех случаях была незначительной. Слой покрытия формировался в областях, которые не находились непосредственно на линии источника УЗ. Размер смачивания на обеих поверхностях являлся функцией мощности, времени воздействия УЗ и температуры паяльной ванны. Оптимальные параметры УЗ активации выбираются при максимальном смачивании поверхности и минимальной ее эрозии.

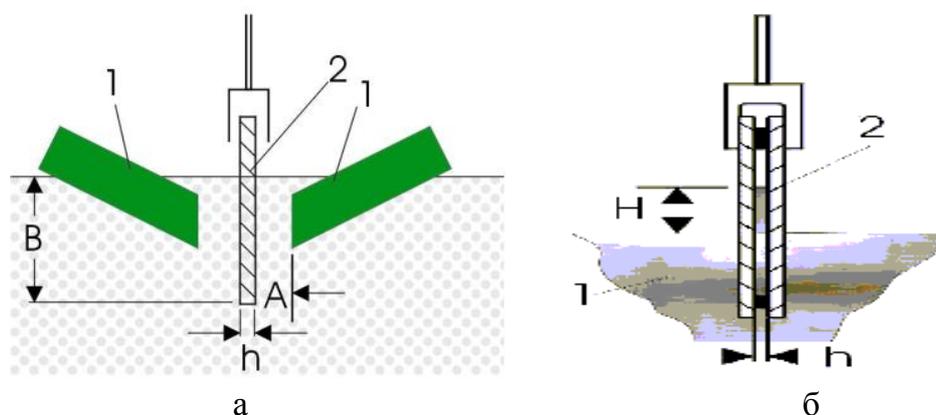


Рис. 8.28. Схемы УЗ локальной пайки (а): 1– излучатель, 2– образец ; проникновения припоя в зазор (б) между платами: 1– припой, 2 – образцы плат

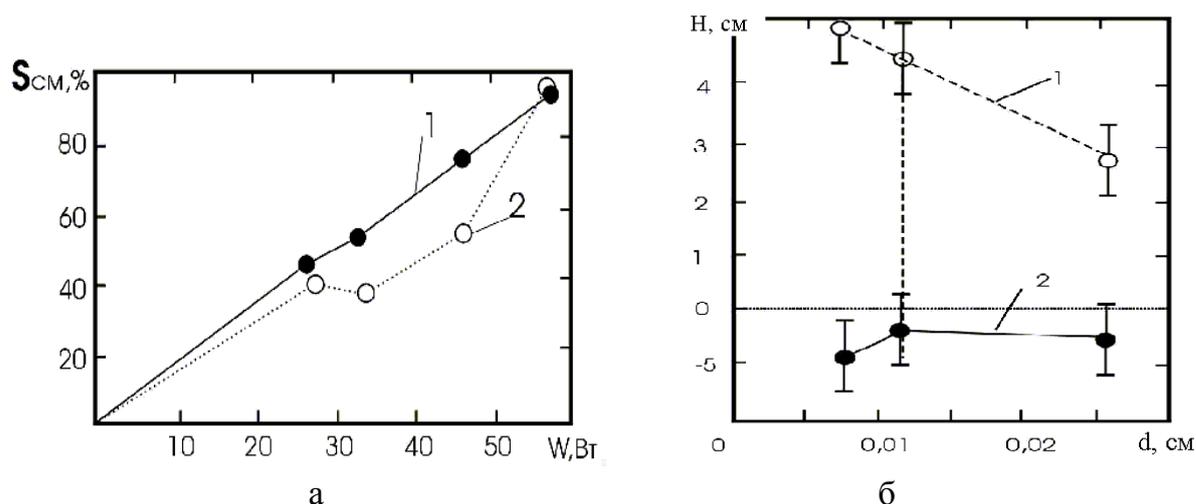


Рис. 8.29. Зависимости площади смачивания от уровня мощности (а) и глубины проникновения припоя (б): 1– передняя, 2– задняя поверхности образцов

Перспективно применение УЗ пайки и металлизации для соединения танталовых стержней с сапфировой подложкой (рис. 8.30, а), контакта с солнечными элементами (рис.8.30, б), соединения проводов из ниобия с ситалловым стержнем (рис. 8.30, в). В последнее время широкое применение процессов УЗ пайки и металлизации наблюдается в странах Западной Европы и США. В первую очередь это связано с высокой экологичностью данных процессов, так как в них не используется флюс и органические растворители и возможно применение бесвинцовых припоев. Применение процессов УЗ пайки позволяет сократить как временные так и финансовые затраты за счет исключения некоторых операций.

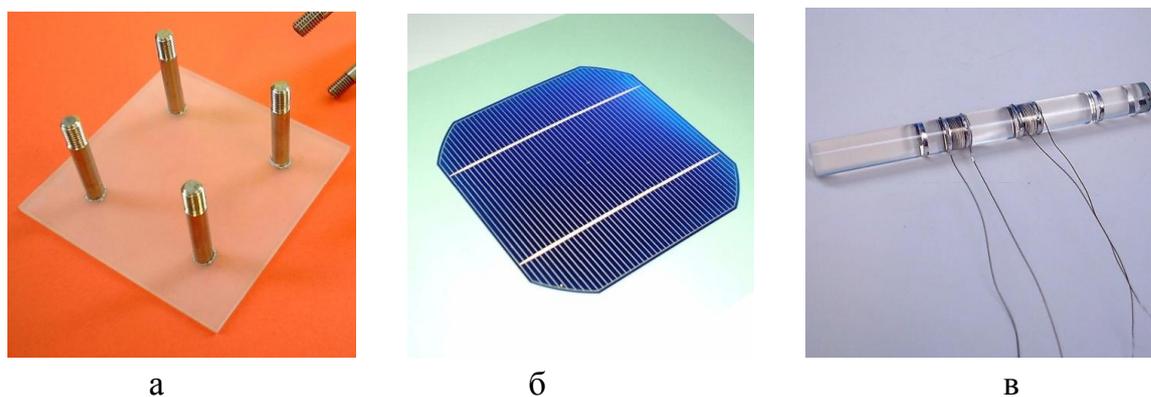


Рис. 8.30. Примеры применения УЗ пайки и металлизации

Разработаны устройства локальной автоматической металлизации (рис. 8.31), в которых расплавленный припой дозированно подается на рабочую поверхность, где происходит УЗ металлизация. Активация припоя, очистка и металлизация детали происходит в заданных размерах, что значительно расширяет возможности установки и обеспечивает ее конкурентоспособность.



Рис. 8.31. Устройство локальной автоматической УЗ металлизации

8.2. Электронно–лучевая и ионно–лучевая пайка соединений

8.2.1. Технология электронно–лучевой пайки

В качестве теплового источника используют электронные пучки низких энергий, полученных из газового разряда высоковольтного типа [39]. Такой разряд позволяет формировать электронные пучки с сечением практически любой формы и геометрических размеров, необходимых для обработки полупроводниковых приборов, что значительно упрощает как процесс нагрева изделия, так и конструкцию теплового источника. Отмеченные возможности высоковольтного разряда можно использовать при производстве силовых полупроводниковых приборов большой мощности, в которых диаметр полупроводниковых кристаллов достигает 100 мм и более.

В образцах из пластин монокристаллического кремния КЭФ-32 толщиной 300 мкм, ориентированных в плоскости, методом диффузии были сформированы тиристорные структуры, контакты к которым изготавливались по стандартным методикам. На ультразвуковом станке УПС-4772 пластины разрезаны на круги диаметром 6 мм, промыты и высушены. Подготовленные таким образом образцы поступили на операцию пайки, которая осуществляется следующим образом. В кассету последовательно закладывали полупроводниковый кристалл 1, припойную прокладку 2 из сплава ПСИн-25 с температурой растекания 270°C и смоченную 10%-ным раствором хлористого цинка, и вольфрамовый термокомпенсатор 3, покрытый электролитическим золотом. Стандартная кассета, выполненная из монолитного куска углерода 4, не пригодна для данной операции, поскольку при резком нагреве пары флюса, и легкоиспаряющихся примесей, содержащихся в припое, создают давление между кристаллом и термокомпенсатором, способное выбросить последний из гнезда кассеты. Чтобы исключить это явление, предложена конструкция кассеты (рис. 8.32), предусматривающая возможность истечения паров флюса из торцевой поверхности промежутка кристалл–термокомпенсатор, что резко уменьшает давление. Взаимодействуя с электронным лучом, пары ионизируются, и возникшие ионы перемещаются под

действием электрического поля в область анода и катода газоразрядной пушки, тем самым значительно уменьшая вероятность загрязнения полупроводникового кристалла. Для предотвращения его загрязнения остатками флюса, адсорбированными пористым углеродом, на дно кассеты закладывается кольцо 5, которое может быть выполнено из кварцевого стекла, керамики или рубина. Кассеты устанавливаются в подколпачное устройство электронно-лучевой установки, выполненной на базе УВН-70А-1. Электронная пушка формирует до четырех электронных пучков в виде отрезка дуги радиусом 220, длиной 70 и шириной 7 мм, что обеспечивает нагрев тиристора до температуры 500°C, а подложкодержатель вращается со скоростью 4 мм/с.

Оптимальные электрические параметры электронного луча, необходимые для процесса пайки, выбирают исходя из равномерного нагрева поверхности прибора и минимального термического влияния на структуру кристалла. Это позволяет получить прочные паяные соединения, в которых отсутствовали непропаи, пустоты, затекания припоя на поверхность кристалла и термокомпенсатора. Контроль температуры полупроводникового кристалла в процессе электронно-лучевого нагрева осуществляется термопарой, расположенной у поверхности тиристора. Наибольший процент выхода годных приборов достигнут при $U=2,5-2,7$ кВ и температуре 300°C. При $U < 2,5$ кВ не удается нагреть зону расплава до температуры, которая обеспечивала бы удаление газов из зоны расплава и молекул газа, адсорбируемых пористым золотым покрытием термокомпенсатора.

В результате этого в паяном шве появляются газовые каверны и неоднородности по глубине фронта сплавления со стороны термокомпенсатора. Газовые каверны резко уменьшают отвод тепла от полупроводникового кристалла, приводящего к перегреву р-п перехода при пропускании через него сильного тока, а неоднородность фронта плавления приводит к неравномерному распределению электрического поля в приборе, влекущее за собой нестабильность параметров тиристора. Бездефектный, но тонкий пластический слой припоя образуется при $U > 2,7$ кВ за счет перегрева, приводящего к его активному испарению вплоть до полного исчезновения.

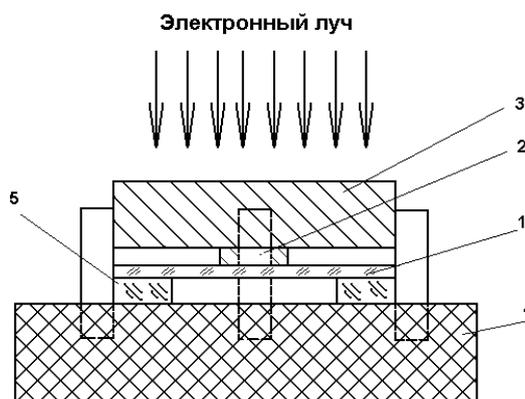


Рис. 8.32. Схема электронно-лучевой пайки полупроводниковых приборов

После пайки соединения проходили операцию отмывки и сушки. Облуживались контактные площадки тиристорного кристалла с использованием электронного луча. Оптимальным значением ускоряющего напряжения при облуживании контактных площадок тиристора является $U=2,6$ кВ, а температура нагрева 300°C , что позволяет обеспечить необходимое качество приборов. Припаивание тиристорного элемента к основанию корпуса и электрических выводов к электродам тиристора проводилось одновременно: в отверстие вкладыша помещаются электроды, на который укладывается тиристорный элемент, а затем основание корпуса облуживалось припоем ПОС 61 при 280°C . Максимальный процент выхода годных структур достигнут при $U=3,4$ кВ и $T_{\text{кр}}=300^{\circ}\text{C}$. Смещение ускоряющих напряжений в сторону больших значений объясняется значительным теплоотводом массивного основания корпуса.

Применение электронно-лучевого нагрева в производстве полупроводниковых приборов на операциях пайки повышает воспроизводимость характеристик паяного шва, выход годных приборов и производительность труда.

8.2.2. Процессы ионно-лучевой пайки и лужения

Актуальной проблемой современной технологии полупроводниковых приборов является бесфлюсовое лужение и пайка, поскольку остатки флюсов – потенциальные инициаторы коррозии и загрязнений. Кроме того, наличие в припое остатков флюса и пузырей воздуха приводит к локальному перегреву силовых электронных компонентов и выходу их из строя. Для формирования соединений в вакууме перспективным направлением является использование низкоэнергетичных ионных потоков. Используя невысокий вакуум (10^{-2} Па) и варьируя энергией и плотностью потока ионов, можно совмещать очистку поверхностей с процессом пайки и лужения. Процессы протекают в контролируемой атмосфере, что позволяет повысить воспроизводимость качества и выход годных приборов [40].

Процесс распыления часто сопровождается инициированием радиационно-стимулированных химических реакций. Бомбардировка ионами инертных газов может вызвать диссоциацию сложных по составу соединений, изменение химического состава поверхностного слоя, стимулированную диффузию, восстановление материала из окисленного состояния. Ионная бомбардировка активирует атомы поверхностного слоя, что стимулирует физико-химическое взаимодействие между припоем и металлом.

Концентрированные потоки ускоренных ионов, фокусируемых в виде луча на поверхность паяемых деталей, позволяют достичь высоких удельных плотностей мощности нагрева, обеспечивают быстроту и локальность нагрева, точность управления тепловой энергией. Воздействуя ионным лучом на поверхность, осуществляют очистку от загрязнений и оксидной пленки, после совмещения деталей сборку подвергают повторному облучению, расплавляя припой. Использование

энергии потоков ускоренных ионов, фокусируемых в виде пучка на поверхности с помощью электростатических и электромагнитных линз в вакууме, позволяет достичь высоких удельных плотностей мощности нагрева, обеспечивает быстроту и локальность нагрева, позволяет точно управлять тепловой энергией.

Для процессов лужения и пайки используют ионные источники типа ускорителя с анодным слоем, который позволяет формировать пучок ионов в виде полого конуса. Такая конфигурация пучка способствует концентрации энергии разряда на поверхности обрабатываемой детали, что ускоряло процессы очистки и нагрева. Энергия ионов регулируется путем изменения напряжения на аноде и составляет 0,5–2,0 кэВ. Пучок ионов под углом 60 градусов от нормали фокусируется на поверхности детали, причем степень фокусировки можно в небольших пределах изменять величиной магнитного поля соленоида, который находится внутри ионного источника (рис. 8.33). Другой важной особенностью конструкции источника является то, что при пролете через область поперечного магнитного поля разрядной системы ионы отклоняются от продольной оси, т. е. возникают условия, способствующие раскручиванию жидкого припоя относительно центра фокуса.

Ионные источники монтируются в вакуумном объеме установок вакуумного напыления типа УРМ (рис. 8.34, а). Под колпаком вакуумной установки (рис. 8.34, б) устанавливаются детали и после создания вакуума ($5 \cdot 10^{-2}$ Па) начинают процесс обработки. В качестве рабочего газа используют аргон высшей очистки. Перед лужением заготовки припоя обезжиривают в изопропиловом спирте.

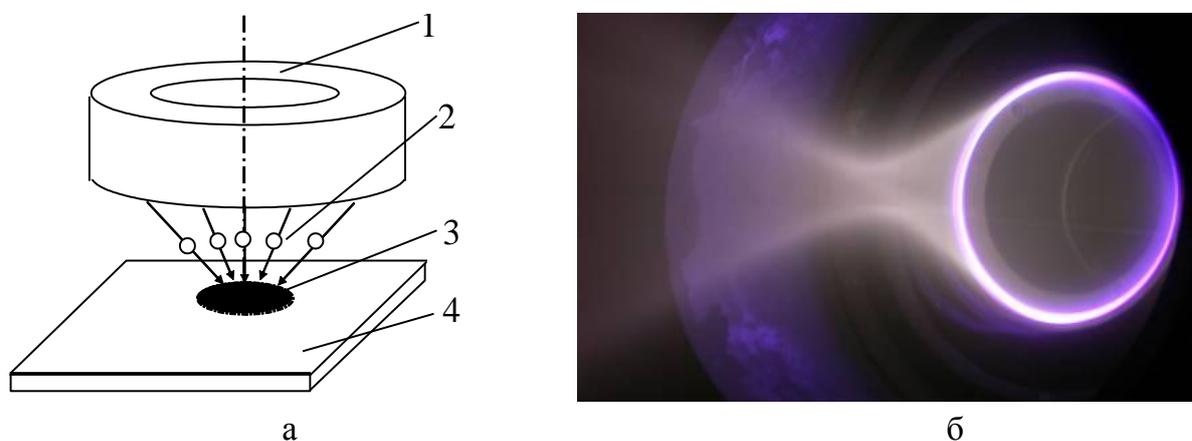


Рис. 8.33. Схема ионно-лучевой пайки (а): 1 – ионный источник, 2 – пучок ионов, 3 – припой, 4 – деталь и ионный пучок в вакууме (б)

Особенностями ионно-лучевого лужения алюминиевых сплавов является наличие зоны вторичного растекания припоя и образование эвтектики с припоем. Вторичное растекание обусловлено проникновением жидкого припоя под оксидную пленку, причем зона вторичного больше зоны первичного растекания в 1,5–2,0 раза. При перегреве возможно образование эвтектического сплава алюминия с оловом и свинцом, что приводит к растворению прилегающего к при-

пою объема сплава. В результате возникает обширная зона взаимодействия, которая ухудшает качество лужения. Анализ результатов показывает, что ионно-лучевое лужение обеспечивает в 2,0–2,5 раза большие значения коэффициентов растекания припоя по сравнению с известными методами [41].

Высокое качество облуженных поверхностей как алюминиевых сплавов, так и тугоплавких материалов может быть объяснено следующим. Прежде всего, при лужении происходит эффективная очистка поверхности металлов и припоя, причем очистка не прерывается и в процессе самого процесса лужения.



Рис. 8.34. Вакуумная установка (а) и устройство ионно-лучевой пайки (б)

Следует также отметить, что эффективность очистки достигается за счет того, что оксиды и загрязнения удаляются в результате одновременно протекающих процессов - физического распыления, сублимации и испарения за счет нагрева, ионно-стимулированных процессов десорбции, диссоциации и восстановления оксидов. Высокая чистота поверхности материалов способствует интенсивному протеканию процессов растекания и смачивания, что с учетом также воздействия «ионного ветра» обеспечивает высокий коэффициент растекания припоя и хорошее смачивание. Адгезионная прочность припоя с металлической поверхностью при ионно-лучевом лужении повышается за счет ионной бомбардировки, а также высокой чистоты поверхностей материалов.

При торможении ускоренных ионов в твердом теле их кинетическая энергия трансформируется в тепловые колебания атомов материала, что является определяющим в процессах лужения и пайки. Вследствие того, что энергию ионов легко изменять в пределах 500–2000 эВ, варьируя ускоряющее напряжение, также легко регулировать и температуру нагрева материала.

Кинетика нагрева облуживаемых или паяемых деталей имеет большое значение для обеспечения качественных соединений, так как скорость нагрева влияет на процессы взаимодействия между металлом и припоем. На рис. 8.35 представлена кинетика нагрева образца в зависимости от напряжения на аноде и тока на мишени-образце. Установлено, что степень расхождения ионного пучка не оказывает существенного влияния на скорость нагрева, а ток мишени оказывает

большее влияние на скорость нагрева, чем ускоряющее напряжение. Ионной бомбардировкой можно достичь температуры 900–950°C, а с помощью дополнительного резистивного нагревателя – 1000–1200°C.

Для определения оптимальных режимов, а именно, энергии ионов, плотности пучка ионов и времени процесса проведены эксперименты на образцах из алюминиевого сплава АМц и припоя ПОС 61. Ускоряющее напряжение на аноде изменялось от 0,5 до 2,0 кВ, ток очистки составлял 5–20 мА, т.е. мощность пучка варьировалась в диапазоне от 2,5 до 40 Вт [42]. Эффективность очистки поверхности металла и припоя подтверждена с помощью фотоэмиссионной спектроскопии. Интенсивность излучения оксида алюминия резко снижается после 1–2 мин ионной очистки при умеренных режимах: $U_{л}=1$ кВ, $I_{л}=10$ мА. Увеличение времени очистки с 5 до 10 мин позволило повысить коэффициент растекания припоя с 3,5 до 5,7 при лужении сплава АМц.

Ионно-лучевое лужение сплава АМц припоем ПОС 61 осуществляли при режимах, представленных в табл. 8.6. Увеличение энергии ионов до 1000–1500 эВ и плотности их потока приводит к увеличению коэффициента растекания припоя. Через 0,5–1,0 мин происходит расплавление припоя и образование сферической капли, а через 4,5–5,0 мин – распыление и десорбция оксидов металла, а так же очистка поверхности припоя. К этому времени образец нагревается до температуры лужения. При выполнении двух условий, а именно отсутствия оксидов и загрязнений в зоне лужения, а также достаточной температуры происходит быстрое (0,5 с) первичное растекание припоя по поверхности.

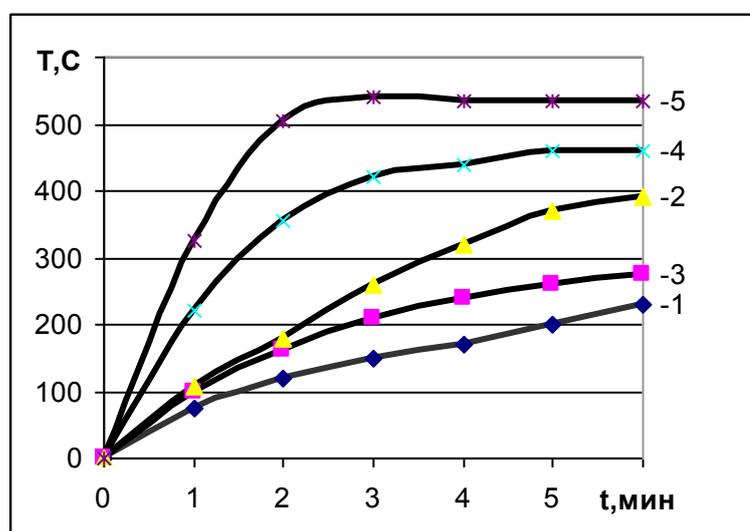


Рис. 8.35. Кинетика ионно-лучевого нагрева при: 1–1 кВ, 10 мА; 2 – 2 кВ, 10 мА; 3 – кВ, 25 мА; 4 – 3кВ, 40 мА; 5 – 3 кВ, 60 мА

Дальнейшая бомбардировка ионами способствует повышению температуры образца, что приводит к затеканию припоя под тонкую оксидную пленку и быстрое растекание припоя под ней. Припой растекается до тех пор, пока не достигнет достаточно толстой пленки оксида. В этой области поток припоя

тормозится и растекание по поверхности прекращается. Однако поступающая масса припоя взрывает слой оксида с образованием локальных капель. Таким образом, формируется зона вторичного растекания. Это происходит в течение 0,5-1 мин после начала растекания. Дальнейшая ионная бомбардировка в течение 3-5 мин вызывает перегрев металла, что приводит к созданию условий для формирования легкоплавких эвтектик алюминия с элементами припоя.

Ионно-лучевое лужение тугоплавких металлов проводят припоями ПОИ 50, ПОС61, ПСр2,5и ПСр45 в соответствии с параметрами, приведенными в табл. 8.6.

Таблица 8.5. Параметры ионно-лучевого лужения сплава АМц

Режимы лужения				K _p		Угол смачивания, град	Адгезия, МПа
Р, Па x10 ⁻²	U _л , кВ	I _л , мА	Время, мин	первичный	вторичный		
7	2,0	40	4,0	6,0	36,4	2	4
6	3,0	40	2,5	5,7	18,1	5	3
8	1,2	20	4,0	3,5	7,4	3	5
6	2,0	40	4,0	4,6	6,7	5	7
6	2,0	40	2,5	7,2	14,2	3	6

Таблица 8.6. Параметры ионно-лучевого лужения тугоплавких металлов

Металл	Припой	Режимы лужения				K _p	θ,град	Адгезия, МПа
		Р·10 ⁻² , Па	U, кВ	I, мА	t,мин			
Мо	ПОИ 50	6	2,0	40	1,0	0,7	18	2,6
Мо	ПОС 61	6	2,5	40	1,5	2,2	10	5,7
W	ПОС 61	7	3,0	50	1,5	1,1	30	2,0
Ta	ПОС 61	6	2,5	40	1,5	2,5	20	4,2
V	ПОС 61	7	3,0	50	1,5	1,9	25	5,7
Ti	ПОС 61	7	3,0	60	1,3	2,1	10	8,5
Ti	ПОС 61	4	1,0	20	1,0	1,2	3	10,0
Ti	ПОС 61	5	2,0	40	1,0	1,3	2	13,5
Ti	ПОС 61	4	3,0	60	1,0	1,1	1	13,8
Mo	ПСр45	7	3,0	60	0,5	3,7	1	16,5
Ti	ПСр2,5	7	3,0	60	0,5	2,6	2	5,6

Для лужения тугоплавких металлов характерно отсутствие вторичного растекания припоя, что можно объяснить прочной оксидной пленкой и высокой температурой плавления. Характеристики растекания припоя хуже, чем у алюминия, однако адгезия припоя имеет величину, близкую к результатам, полученным при лужении алюминиевых сплавов. Для припоев типа ПСр45, можно достичь отличных результатов, так как так же могут создаваться условия для возникновения зоны вторичного растекания.

Ионно-лучевое лужение применено при сборке алюминиевых микрокорпусов интегральных схем [43]. Процесс включал нанесение фоторезистивной маски, анодное оксидирование основы корпуса, ионную очистку и лужение углубления в корпусе для посадки кристалла. Ионная очистка проводилась в течение 3–5 мин при энергии ионов 700 эВ, ионное лужение – в течение 1 мин при энергии ионов 1500 эВ. Для припоев ПОС 61 и ПОИ 50 коэффициент растекания составил 3–7, угол смачивания 1–3 градуса, прочность соединений – 4–7 МПа.

Список литературы к главе 8

1. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция. – М.: Химия, 1986. – 288 с.
2. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкостях. – В кн.: Методы и приборы ультразвуковых исследований. Под ред. У. Мэзона. – М.: Мир, 1967, т. 1, ч. Б. – С. 7–186.
3. Румак Н. В., Ланин В.Л., Бондарик В.М. Динамика захлопывания кавитационных полостей в жидкостях и расплавах // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-техн. наук. – 1996. – № 1. – С. 115–118.
4. Stereoscopic high-speed recording of bubble filaments / J. Appel [ets] // Ultrasonic Sonochemistry. – 2003. – № 11. – P. 39–43.
5. Ланин В. Л., Тявловский М.Д. Исследование ультразвуковых микропотоков в жидкостях и расплавах // Доклады АН БССР. – 1984. – Т. 28. – № 5. – С. 427–429.
6. Прохоренко, П.П. Ультразвуковой капиллярный эффект / П.П. Прохоренко, Н.В. Дежкунов, Г.Е. Коновалов. – Минск: Наука и техника, 1981. – 135 с.
7. Корнфельд М., Молохова Н. Вспучивание жидкости под действием ультразвука // Докл. АН СССР. – 1995. – Т. 105. – № 3. – С. 476.
8. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов / О.В. Абрамов [и др.]. – М.: Наука, 1986. – 277 с.
9. Belyakov S.A. Ultrasonic Modification of Sn-Ag-Cu Alloy Microstructure // 9th Inter. Workshop and Tutorials, EDM'2008. 1-5 July. Erlagol. P. 58–59.
10. Шутилов В.А. Основы физики ультразвука. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. – 280 с.
11. Лашко Н. Ф., Лашко С.В. Контактные металлургические процессы при пайке. – М.: Металлургия, 1977. – 192 с.
12. Клубович В.В., Тявловский М.Д., Ланин В.Л. Ультразвуковая пайка в радио- и приборостроении. – Минск: Наука и техника, 1985. – 263 с.
13. Дохов М.П., Розов В.И., Повежев М.Х. Температурная зависимость смачиваемости пьезокерамики оловом, свинцом и их сплавами // Физика межфазных явлений. Нальчик, 1980. – С. 156–159.
14. Алиева М.П., Гликман Е.З., Горюнов Ю.В. Влияние некоторых физико-химических факторов на смачивание алюминиевых сплавов легкоплавкими

- припоями при воздействии ультразвука // Физика и химия обработки материалов. – 1973. – №1. – С. 130–136.
15. Тявловский М. Д., Ланин В.Л. Ультразвуковая пайка и металлизация неметаллических материалов в технологии РЭА // Перспективные направления в технологии радиоаппаратостроения. Л.: ЛДНТП, 1979. – С. 36–40.
 16. Kolenak R. Solderability of Metal and Ceramic Materials by Active Solders. – Dresden: Forschungszentrum, 2008. – 99 p.
 17. Ланин В.Л. Моделирование процессов диффузии при совместном воздействии ультразвуковых и электромагнитных полей // Доклады НАН Беларуси. – 2005. – Т.5.– № 1. – С. 52–55.
 18. Прохоренко П.П., Пугачев С.И., Семенова Н.Г. Ультразвуковая металлизация материалов. – Минск: Наука и техника, 1987.– 271 с.
 19. Тявловский М. Д., Ланин В.Л. Исследование физико-механических свойств и структуры металлических спаев со стеклокерамическими материалами, полученных ультразвуковой металлизацией // Электронная техника. Сер. 6.– 1981 – Вып. 4 (141).– С. 3–5.
 20. Ланин В.Л. Активация процессов формирования паяных соединений энергией ультразвуковых и электрических полей // Электронная обработка материалов. – 2008. – № 3.– С. 82–88.
 21. Sprovieri J. Soldering the Unsolderable // Assembly. – 2008. – № 4.– P. 34–36.
 22. Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С. Ультразвуковые электро-технологические установки. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 208 с.
 23. Denslow G.A. Ultrasonic Soldering // Wire J. – 1976.– V. 9.– № 9. – P. 131 – 136.
 24. Saxty P. Ultrasonic soldering in the electronics industry // Metallurgy. – 1995. – № 62(8). – P. 287.
 25. Свергунов В.Ф., Ланин В.Л., Чернышевич И.Н. Локальное ультразвуковое лужение выводов радиоэлементов // Электронная промышленность. – 1994. – № 6. – С. 43–44.
 26. Абрамов О.В. Воздействие мощного ультразвука на жидкие и твердые металлы. – М.: Наука, 2000. – 312 с.
 27. Автоматизация пайки печатных плат / С.Л. Буслович [и др.].– М.: Энергия, 1976. – 217с.
 28. Аньев О. Г., Тищенко Л.М., Андросов Г.А. Использование ультразвука для лужения и пайки полупроводниковых приборов // Электронная техника. Сер. 10. – 1970. – Вып. 1(33).– С. 34 – 40.
 29. Ланин В.Л. Бесфлюсовая пайка в электронике // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 3. – С. 16–20.
 30. Трегубов С.В., Тявловский М.Д., Ланин В.Л. Устройство для ультразвукового лужения заготовок // Обмен производственно-техническим опытом. – 1986. – Вып. 7. – С. 41 – 42.
 31. Lanin V.L. Ultrasonic Soldering: New Opportunities // Solid State Electrochemistry / Ed. By T. G. Willard: N.Y.: NOVA Publ., 2010. – P. 201–211.

32. Ланин В.Л. Ультразвуковая пайка и лужение в электронике // Технологии в электронной промышленности, 2009, № 7. – С. 24–29.
33. Inava M., Yamakawa K., Iwase N., Solder Bump Formation Using Electroless Plating and Ultrasonic Soldering // IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufac. Technology. – 1990. – V. 13. – № 1. – P. 119–122.
34. Development of Flux-Less Soldering Method by Ultrasonic Modulated Laser / M.Y. Li, C.Q. Wang, H.S. Bang, Y. R. Kim // J. of Materials Processing Technology. – 2005. – № 168. – P. 303–307.
35. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. В 2 т. Т.1 / С. П. Кундас [и др.]; под ред. А.П. Достанко. – Минск: Бестпринт, 2003. – 224 с.
36. Lanin V.L. Ultrasonic Soldering in Electronics // Ultrasonics Sonochemistry. – 2001. – № 8. – P. 379–385.
37. Faridi H. R., Devletian J.H., Le H.P. New Look at Flux-Free Ultrasonic Soldering // Welding J. – 2000. – № 9. – P. 41–45.
38. Vianco P. T., Hosking F. M., Rejent J. A. Ultrasonic soldering for structural and electronic applications // Welding J. – 1996. – № 5(11). – P. 343–355.
39. Применение низкоэнергетических электронных пучков в технологии производства полупроводниковых приборов/ А.Н. Комов [и др.] // Электронная техника. Сер.7. – 1982. – Вып. 4(113). – С.61–63.
40. Андожский С.О., Радченко Л.А., Генералов Е.И. Использование ионных потоков в качестве энергоносителя // Техника и технология сварки в радиоэлектронике и приборостроении: Матер. семинара. Л.:ЛДНТП, 1983. – С. 54–59.
41. Ионно-лучевое лужение и пайка полупроводниковых приборов и элементов РЭА / А.П. Достанко [и др.] // Весці АН Беларусі. – 1993. – № 4. – С.53–57.
42. Ланин В.Л., Телеш Е.В. Пайка ионным лучом в вакууме // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 7. – С. 64–68.
43. Telesh E.V., Shulgov V. Component Placement in the Micro Package with Application Ion-Beam Soldering // Workshop on Wafer Bonding for MEMS Technologies, Halle, Germany, 2004. – P. 75–78.

ГЛАВА 9

МОНТАЖНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

9.1. Монтаж кристаллов и микроплат на токопроводящий клей

Операция монтажа кристаллов и микроплат в корпуса – наиболее ответственная в технологическом процессе сборки изделий электроники, так как обеспечивает требуемое расположение кристалла и микроплаты в корпусе, прочное механическое соединение, надежный электрический контакт и хороший теплоотвод. Эксплуатационная надежность мощных транзисторов определяется, главным образом, их теплоэлектрическим состоянием, которое формируется на стадии присоединения кристалла к корпусу. Скрытые дефекты соединений (пустоты, микротрещины, сколы) приводят к образованию участков под кристаллом с аномально высоким тепловым сопротивлением. Если площадь дефектов невелика по сравнению с площадью кристалла и не затрагивает активной структуры транзистора, то соединение имеет низкий уровень теплового сопротивления. Однако, в процессе длительной эксплуатации в условиях экстремальных термоциклических воздействий изделия могут оказаться потенциально-ненадежными из-за развития микротрещин до активной структуры. Уровень термических напряжений во многом зависит от качества присоединения кристаллов на припой.

Монтаж кристаллов на выводные рамки: пайкой эвтектическими сплавами или легкоплавкими припоями, приклеиванием на токопроводящую композицию должны обеспечить высокую прочность соединений при термоциклировании и механических нагрузках, низкое электрическое и тепловое сопротивление, минимальное механическое воздействие на кристалл и отсутствие загрязнений.

В источниках вторичного питания компании International Rectifier до 90% всех пассивных и активных компонентов смонтированы на керамической плате при помощи электропроводящей клеевой композиции, в том числе на основе порошка серебра ABLEBOND 8370C (производитель Ablestik, Великобритания), имеющей низкую вязкость, автоматизации нанесения на элементы с минимальными размерами 0,5–1,0 мм.

Для технологий микросборочного производства разработаны одноупаковочные клеевые составы, не содержащие растворителей, со сроком хранения не менее шести месяцев при температуре (1–5)°С, отверждающиеся при температурах от 120 до 175°С в течение 2–3 ч, с адгезионной прочностью на сдвиг на алюминиевых сплавах до 10 МПа, удельным электрическим сопротивлением (ρ_v) не более $2,0 \cdot 10^{-4}$ Ом·см, с температурами стеклования от 25 до 125°С [1].

Однокомпонентный токопроводящий клей ОТК-С (ТУ2252-599-56897835-2014) с порошком серебра отверждается при 175°С, имеет ρ_v не более $2,5 \cdot 10^{-4}$ Ом·см, коэффициент теплопроводности 2,15 Вт/(м·К), температуру стеклования (T_g) ≥ 42 –44°С, модуль упругости 50–60 МПа при температуре 150°С, 2300–2600 МПа при тем-

пературе 25°C. При склеивании алюминиевых сплавов клей ОТК-С обеспечивает следующие прочностные характеристики:

- $\geq 11,7$ МПа при температуре 20°C;
- $\geq 2,5$ МПа при температуре 150°C;
- $\geq 1,4$ МПа при температуре 200°C;
- $\geq 9,4$ МПа при температуре –196°C.

Для СВЧ-модулей разработан одноупаковочный серебрясодержащий клей ТК-СВ в АО "Российские Космические Системы" для соединений микроплат из кремния, арсенида галлия, поликора к основаниям из ковара 29НК, который работоспособен при температурах от –60°C до 150°C.

С применением клея марки ТК-СВ были изготовлены и испытаны макетные образцы соединений элементов микросборок из компонентов микроэлектроники (кремния, арсенида галлия, поликора и ковара 29НК) (рис.2). Образцы микросборок испытаны на устойчивость к механическим нагрузкам (высокочастотной и низкочастотной вибрации, квазистатическим и ударным нагрузкам), к воздействию изменения температур в интервале от –60°C до 150°C. В результате испытаний установлено, что соединения на клее ТК-СВ устойчивы к воздействиям: температуры 150°C в течение не менее 1000 ч; кратковременно до 230°C (при пайке компонентов); ультразвуковой и термозвуковой сварки переключателей и выводов; квазистатических нагрузок: продольных, поперечных, ударно-импульсных и низкочастотных вибраций.

технологичную низковязкую консистенцию, хранится при температуре от 0 до 5°C не менее шести месяцев, режимы отверждения – 1 ч при температуре 175°C или двухэтапный при меньших температурах: 1 ч при 120°C и 1 ч при 150°C. После отверждения имеет электрическое сопротивление ρ_v не более $2,0 \cdot 10^{-4}$ Ом·см, коэффициент теплопроводности λ , равный 2,2–2,5 Вт/(м · К), высокую адгезию к кремнию, поликору, титановым, алюминиевым сплавам, пьезокерамике, температуру стеклования (T_g) $\geq 120^\circ\text{C}$, модуль упругости более 2 000 МПа при температуре 150°C, более 7 000 МПа при температуре 25°C. Этот клей при склеивании алюминиевых сплавов обеспечивает прочность на сдвиг до 10,0 МПа при 20°C и не менее 2,0 МПа при температуре 200°C.

Низковязкий токопроводящий клей ЭТК-9С (с порошком серебра) имеет тиксотропную технологичную консистенцию, высокую адгезию к кремнию, поликору, титановым, алюминиевым сплавам, пьезокерамике, хранится при температуре от 0 до 5°C не менее шести месяцев, отверждается 1–2 ч при температуре 120°C и 1 ч при 150°C, имеет $\rho_v \leq 2,0 \cdot 10^{-4}$ Ом·см, температуру стеклования (T_g) не менее 70°C, модуль упругости более 500 МПа при температуре 150°C, более 6000 МПа при температуре 25°C, при склеивании кристаллов, алюминиевых сплавов обеспечивает прочность на сдвиг до 8,0 МПа при 20°C.

Для создания микросборочного производства СВЧ-модулей был разработан одноупаковочный клей ТК-СВ, опытная партия которого была опробована в АО "Российские Космические Системы" на установке посадки кристаллов JFP PP-6 (рис.1).

С применением клея марки ТК-СВ были изготовлены и испытаны макетные образцы соединений элементов микросборок из компонентов микроэлектроники (кремния, арсенида галлия, поликора и ковара 29НК) (рис.2). Образцы микросборок испытаны на устойчивость к механическим нагрузкам (высокочастотной и низкочастотной вибрации, квазистатическим и ударным нагрузкам), к воздействию изменения температур в интервале от –60°C до 150°C. Все макетные образцы

9.2. Монтаж кристаллов полупроводниковых приборов на эвтектику

Если кристаллы приборов имеют значительную мощность рассеяния (более 0,5 Вт), то между подложкой кристалла и посадочной площадкой выводной рамки необходимо создать токопроводящий электрический контакт с незначительным электрическим и тепловым сопротивлением, что достигается использованием методов пайки. Для тех приборов, в которых мощность рассеяния кристалла невелика, а электрическое сопротивление между подложкой кристалла и рамкой незначительно влияет на работу прибора, то кристалл приклеивают на токопроводящую композицию.

Посадка кристалла на эвтектические сплавы помимо технологических трудностей (высокие температуры, золотое покрытие) имеет и другие недостатки. В виду малой пластичности эвтектики Au–Si и разницы в коэффициентах термического расширения кристалла и рамки в напаянном

кристалле возникают значительные механические напряжения, что приводит к сколам кристаллов при пайке, последующих технологических операциях и испытаниях, а также к снижению надежности приборов.

Тепловую модель мощного транзистора с напаянным кристаллом на кристаллодержатель можно представить в виде трех многослойных параллелепипедов, которые имитируют кристалл с плоским источником тепла на его поверхности, слой припоя заданной толщины и участок кристаллодержателя, ограниченного размерами паяного соединения (рис. 9.1). Тепловое сопротивление напаянного кристалла, исходя из упрощенной тепловой модели [2], можно определить из выражения:

$$R_{thjc} = \sum_{i=1}^3 R_{ti} = \frac{1}{\lambda_{Si}} \int_0^{L_{kp}} \left(\frac{dL}{b + LtgB} - \frac{dL}{a + LtgB} \right) + \frac{L_{np}}{\lambda_{np} \cdot S_{np}} + \frac{1}{\lambda_{Cu}(a-b)} \ln \frac{b+2L}{a+2L} \cdot \frac{a}{b} \quad (9.1)$$

где λ_{Si} , λ_{np} , λ_{Cu} – теплопроводности кристалла, припоя, кристаллодержателя; L_{Si} , L_{np} , L_{Cu} – толщина кристалла, припоя, кристаллодержателя; a и b – размеры источника тепла; tgB – тангенс угла растекания теплового потока.

При толщине паяного соединения, равной 50 мкм, расчетное значение R_{thjc} составляет $0,545^\circ\text{C}/\text{Вт}$ и при этом выполняется необходимое условие $R_{thjc} < R_{thjc}$. На зарубежных образцах изделий фирм Siemens, International Rectifier реальная толщина припоя под кристаллом составляет 45–60 мкм.

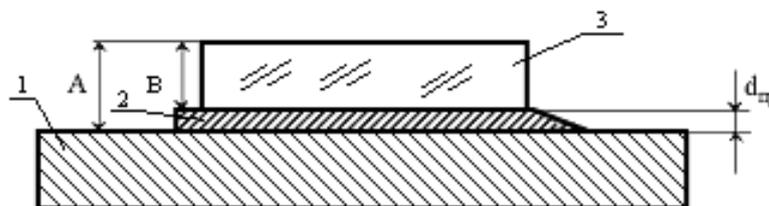


Рис. 9.1. Схема монтажа кристалла: 1 – кристаллодержатель, 2 – припой, 3 – кристалл

При выборе нижнего предела учитывают, что существует критическая величина паяного соединения, ниже которой резко снижается надежность изделий в экстремальных условиях эксплуатации из-за возникновения внутренних механических напряжений, превышающих допустимый уровень для данной конструкции прибора. Для ИС и полупроводниковых приборов с площадью кристалла более 25 мм минимальная толщина соединения "кристалл-корпус" должна быть не менее 25 мкм. Максимальное напряжение, возникающее при охлаждении кристалла, определяется выражением:

$$\sigma_{max} = K(\alpha_1 - \alpha_2)(T - T_0) \sqrt{\frac{E_1 E_2 L}{X}}, \quad (9.2)$$

где σ_{max} – максимальное напряжение; K – безразмерная константа, α_1, α_2 – коэффициенты линейного термического расширения припоя и кремния; E_1, E_2 –

модули упругости припоя и кремния; L – длина кристалла, T , T_0 – температуры пайки и окружающей среды.

Внутренние напряжения в напаянном кристалле могут достигать 50–65 МПа и при воздействии термоциклических нагрузок привести к образованию трещин в кристалле. При уменьшении толщины припоя внутренние напряжения возрастают, поэтому для обеспечения надежности изделий выбирают толщину припоя в пределах 35–50 мкм.

В производстве полупроводниковых приборов в пластмассовых корпусах типа ТО-92 фирмы Siemens (Германия), Motorola (США), LGS (Корея) используют рамки выводные, содержащие локальную полосу серебра толщиной 2–5 мкм. Присоединение кристаллов к рамкам осуществляется контактно-реактивной пайкой с образованием эвтектики Ag–Si. Для снижения температуры образования соединения на непланарную поверхность кристаллов наносят системы металлизации: Ge–Au, Ti–Ge–Au, V–Au, Au–Ag с подслоем золота толщиной 1 мкм. Так как адгезия золота к кремнию недостаточная, то перед напылением в вакууме слоя золота сначала осаждают пленку титана.

Проведены исследования по выбору оптимального способа монтажа кристаллов для двух систем металлизации: Ti–Ge–Au и V–Au, обеспечивающего требуемый уровень электрических параметров, а также воспроизводимый уровень качества продукции. После формирования MOSFET-транзисторных структур типа BSS295 обратная сторона пластин подвергалась утонению методом фрезерования от 460 до 340 мкм. После отмывок и обработки в 1% растворе HF проводилось напыление на установке «Оратория 9» подслоя Ti–V электронно-лучевым методом, золота толщиной 0,6–1,5 мкм термическим испарением [3].

После разбраковки по электрическим параметрам и внешнему виду пластины разделялись на кристаллы дисковой резкой на полуавтомате ЭМ–225. Пайка кристаллов выполнялась на автомате ЭМ–4105 при варьировании технологических режимов по температуре 400–500°C и параметров вибрации инструмента (количество периодов колебаний $N_{x,y} = 1–40$ ед). После напайки кристаллов на рамку выводную проводился контроль качества как визуальным осмотром, так и путем воздействия нормированной нагрузки на срез до разрушения кристалла.

Установлено, что основными причинами, приводящими к снижению выхода годных изделий, являются: отслаивание кристаллов из-за неполного образования эвтектики по всей площади; образование микротрещин и растрескивание кристаллов после пайки и термокомпрессионной разварки выводов. На рис. 9.2 приведена зависимость количества отслаиваний кристаллов от толщины слоя золота на кристалле.

Анализ причин отслаивания кристаллов показал, что образование эвтектики произошло только в локальных зонах и при малых толщинах (менее 1,0 мкм) золота не хватает для участия в эвтектике тройного состава. Это обусловлено тем, что на первой стадии взаимодействия образовывается фаза Au–Si, которая уже на второй стадии будет участвовать в образовании Au–Si–Ag. Однако обра-

зование фазы Au–Si на первой стадии может быть затруднено из-за присутствия барьера в виде толстого слоя Ti, а также из-за присутствия тонкой оксидной пленки SiO₂ перед напылением металлов.

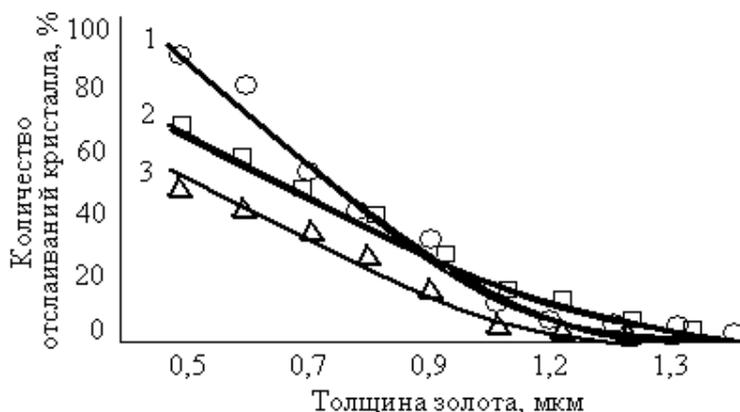


Рис. 9.2. Влияние толщины золота на кристалле на количество отслаиваний кристалла: 1 – Ti–Ge–Au с малым временем обработки в HF; 2 – Ti–Ge–Au; 3 – V–Au

При толщине остаточного оксида более 50 Å и температурах пайки 400–500°C взаимодействие Ti с Si не происходит и кремний не проникает в золото в необходимом количестве. Поэтому площадь образования эвтектики под кристаллом мала и происходит отслаивание кристалла (рис. 9.3). Реакция между Ti и Si происходит только при 900°C с образованием TiSi₂.

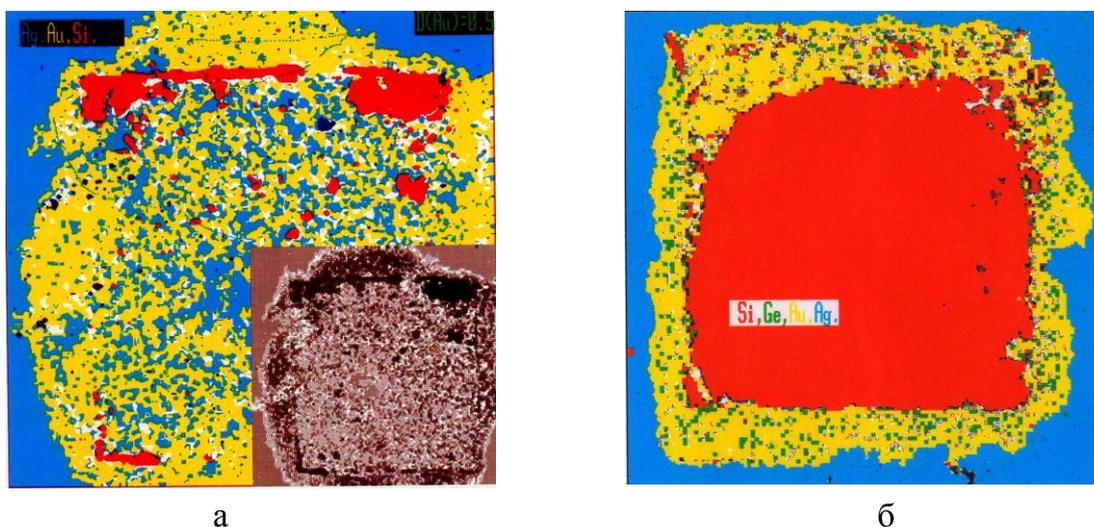


Рис. 9.3. Состояние паяного соединения под кристаллом после сдвига кристалла: а) плохое качество (эвтектика – 5,0% площади кристалла); б) хорошее качество (эвтектика составляет 95,0% площади кристалла)

В случае малой толщины остаточного оксида < 50 Å при температуре напайки уже происходит образование TiSi₂ и в результате межзеренной диффузии атомы Si проникают в глубь золота с образованием сначала эвтектики AuSi, а затем эв-

тектики тройного состава AuSiAg. Ti, являясь эффективным геттером, захватывает атомы кислорода из атмосферы в подколпачном устройстве с образованием оксида: $Ti + Si \rightarrow TiO_2$. Анализ бракованных приборов выявил образование трещин и расслоений кристаллов. Для варианта с уменьшенным временем обработки в HF брак по $R_{си}$ обусловлены некачественной напайкой, то есть образованием эвтектики по площади кристалла составляет 90%, а 10 % обусловлены наличием трещин в кристаллах.

Таким образом, повышение качества пайки, которое отмечается для варианта V – Au, способствует снижению брака по $R_{си}$ до 2,5%, но отмечается увеличение брака по $I_{с\text{ ост}}$ до 7%. Установлено, что повышение сплошности эвтектики под кристаллом приводит к росту количества приборов с трещинами в кристаллах. Это связано с тем, что трещины в напаянных кристаллах возникают из-за внутренних механических напряжений в используемых материалах.

Исследовано влияние режимов пайки на растрескивание кристаллов при $T=430^\circ\text{C}$ и $T=480^\circ\text{C}$, параметрах вибрации 1–40 периодов колебаний при $A_{x,y} = 1$ ед. После пайки выполнялась разварка Au проволоки толщиной 30 мкм и приборы проходили полный технологический маршрут изготовления и контроль. Увеличение количества колебаний инструмента в процессе пайки кристаллов приводит к уменьшению брака по параметрам $R_{си}$ и $I_{с\text{ ост}}$ и к снижению количества приборов с микротрещинами и растрескиванием кристаллов (рис. 9.4).

На рис. 9.5 условно показано расположение зоны пайки кристаллов по длине нагревательного столика и температурный профиль процесса. Длина нагревательного столика составляла 10 см, а зона, где проводится пайка кристаллов, расположена на расстоянии четырех кадров рамки выводной от края столика. Это значит, что во время пайки пятого кристалла, первый напаяваемый кристалл уже вышел за пределы нагретого столика.

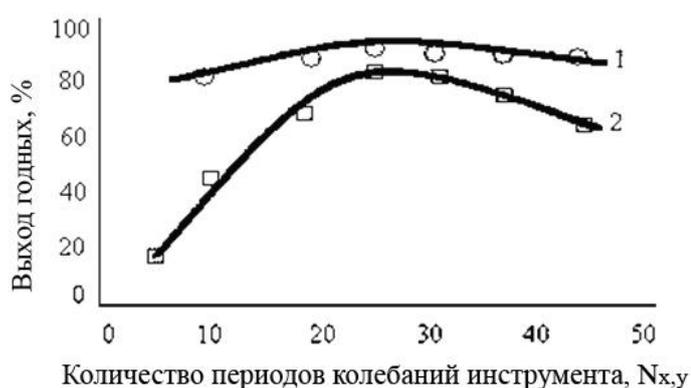


Рис. 9.4. Зависимости выхода годных приборов от количества колебаний инструмента ($N_{x,y}$): 1 – 430°C, 2 – 480°C

Время присоединения кристалла при $N=1$ ед. составляло 50 мс, а при $N=40$ колебаний инструмента – 2000 мс.

По мере выхода рамки выводной из зоны нагревателя происходит снижение температуры кристалла, так как рамка выводная отдает тепло окружающей сре-

де. При этом для варианта $N = 1$ ед. ($t = 50$ мс) значительное снижение температуры кристалла наступает, когда 30 % рамки выйдет за пределы нагревателя. В этом случае градиент снижения температуры составляет свыше $100^\circ\text{C}/\text{с}$.

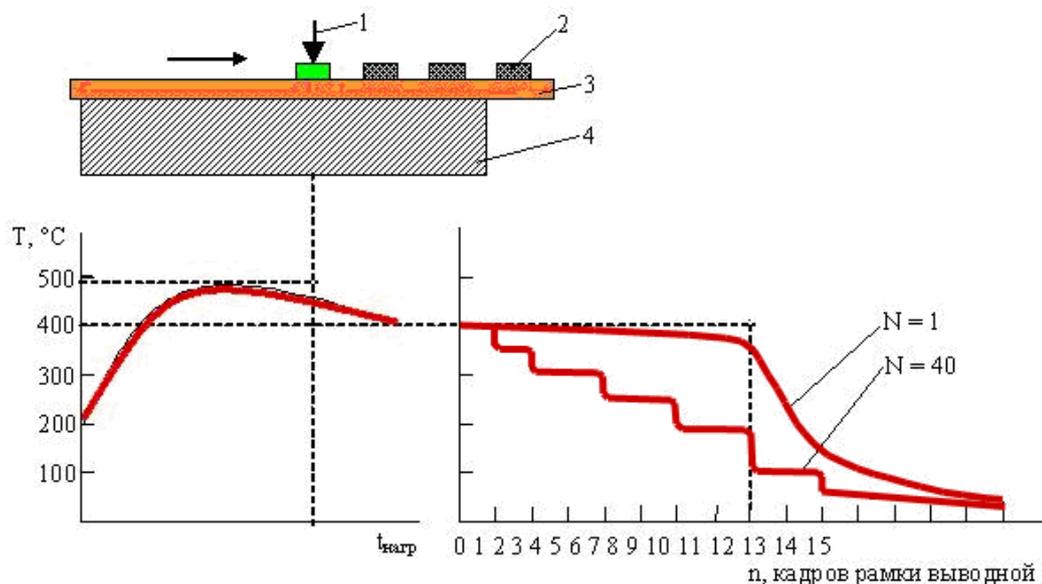


Рис. 9.5. Условное изображение расположения зоны напайки кристаллов по длине нагревательного столика (а) и температурный профиль процесса (б): 1 – монтаж кристалла, 2 – напаянный кристалл, 3 – рамка выводная, 4 – столик

Для варианта $N = 40$ ед. ($t = 2000$ мс) снижение температуры происходит равномерно по мере выхода кадра из зоны нагревателя. Чем дальше кадр рамки от нагревателя, тем быстрее происходит охлаждение кристалла. При этом градиент температуры составляет всего $15\text{--}20^\circ\text{C}/\text{с}$. По мере выхода рамки выводной из зоны нагревателя происходит снижение температуры поверхности рамки, которая отдает тепло окружающей среде.

Таким образом, высокая скорость пайки создает значительный градиент температур, что приводит к своеобразному термоудару, в результате которого, и возникают термомеханические напряжения в кристаллах, способствующие образованию микротрещин и растрескиванию кристаллов. Поэтому при эвтектической пайке кристаллов для снижения брака по $R_{\text{сн}}$ необходимо: обеспечить подготовку непланарной поверхности перед вакуумным осаждением V–Au (обработка в HF для удаления остаточного оксида SiO_2); при формировании металлизации получить толщину Au до $1,5$ мкм и обеспечить плавное охлаждение кристаллов после напайки.

Однако из-за большого различия в ТКЛР используемых материалов возникающие термомеханические напряжения приводят к образованию микротрещин в кристаллах, и в итоге – к росту уровня $I_{\text{ост}}$. Поэтому для монтажа кристаллов большой площади целесообразен их монтаж на припой и на электропроводящий клей.

9.2. Автоматизированный монтаж кристаллов вибрационной пайкой

Для автоматизированного монтажа кристаллов мощных полупроводниковых приборов созданы новые технологии и оборудование, исключающие недостатки процессов сборки в водородных печах. Монтаж кристаллов с приложением вибраций амплитудой 0,5–1,0 мм в плоскости основания позволяет обеспечить равномерное растекание припоя и до минимума свести дефекты в паяном соединении в виде пустот. Для монтажа кристаллов размером 1–11 мм в приборах в корпусах SOT, SOD, SO, PSSO, PSOP, DPAK, TO, PQFN, Power LED и др. компанией Esec (Швейцария) разработан автомат Die Bonder 2009 SSI, имеющий автоматические загрузчики пластин и рамок приборов, дозатор припоя, 8-ми зонный контролируемый нагреватель, высокоразрешающую видеосистему. Время цикла монтажа составляет 0,6 с, точность присоединения ± 80 мкм/ $\pm 0,8^\circ$, коэффициент воспроизводимости монтажа $C_p > 1,33$ (рис. 9.6). Технология присоединения кристаллов на легкоплавкий припой патентована, а стоимость такого оборудования более 250 000 долларов США.



Рис. 9.6. Автомат присоединения кристаллов Die Bonder 2009 SSI

В крупносерийном производстве для присоединения кристаллов к корпусам полупроводниковых приборов широкой номенклатуры вибрационной пайкой эффективен автомат ЭМ-4085-14М фирмы ПЛАНАР (Беларусь) (рис. 9.7), в состав которого входят микропроцессорный контроллер, оптико-телевизионная система распознавания кристаллов, линейный шаговый двигатель перемещения кристаллов, двухкоординатный стол сварочной головки, магазинный механизм

автоматической подачи корпусов [4]. Производительность автомата для пайки кристаллов размером от 1×1 до 5×5 мм составляет 2000, для посадки на клей - 3500 и на стеклоприпой – 600 кристаллов в час.

Нагреватель в автомате туннельного типа содержит 12 зон контролируемого и регулируемого нагрева до 450⁰С, блок формирования защитно-восстановительной атмосферы смешивает газы Н₂ и N₂ в смесь 10:90 (формиргаз) для активирующего воздействия на процесс монтажа кристаллов. Нанесение дозы расплавленного припоя в зону монтажа кристалла осуществляется автоматически проволочным дозатором, при этом программируется не только скорость вращения центрального распределительного вала, но также скорости движения вакуумного захвата и съема кристаллов.

Монтаж кристаллов высоковольтных мощных транзисторов размером 5,0x5,0x0,34 мм, содержащими на непланарной стороне систему металлизации Ti-Ni-Ag, на рамку из медного сплава Cu-Sn-0,15, покрытую слоем никеля толщиной 3–6 мкм, осуществляется на припой Sn-Ag-Sn с активным движением кристалла в процессе пайки по программируемой траектории. Использовался проволочный припой Ø1_{-0,07} мм марки ПСрОСу, намотанный на пластмассовую катушку, закрепленную в дозаторе, который подавался в зону лужения линейным шаговым двигателем, на который поступали управляющие импульсы, количество которых предварительно программируется.



Рис. 9.7. Автомат присоединения кристаллов ЭМ-4085-14М

Определены условия эффективного отрыва капли припоя в зоне лужения кристаллодержателя. Оптимальный диапазон температур дозирования составил 370–390⁰С. При расчете дозы припоя учитывалось, что минимальная толщина припоя под кристаллом должна быть на уровне 25–35 мкм. В процессе вибрационной пайки часть припоя выдавливается за пределы кристалла, что составляет

порядка 30% от полезного объема припоя, тогда объем дозы припоя примерно равен:

$$V_{\Sigma} = V_k + V_n. \quad (9.3)$$

где V_k – объем капли припоя; V_n – потери припоя.

При подаче одиночного импульса на дозатор двигатель перемещает проволоку припоя в активную зону на расстояние K , равное, примерно 8–10 мкм, поэтому количеством импульсов, определяющих дозу припоя составляет:

$$N = \frac{L}{K}, \quad (9.4)$$

где L – расстояние, на которое необходимо переместить проволоку припоя:

$$L = \frac{V_{\Sigma}}{S_{np}}, \quad (9.5)$$

где V_{Σ} – объем припоя, S_{np} – сечение проволоки припоя.

Температура монтажа кристаллов должна на 20–30⁰С превышать температуру дозирования капель припоя.

Контроль выхода годных приборов при использовании различных режимов вибрации в процессе пайки кристаллов показал, что при малой дозе припоя (100 имп) выход годных не превышает 95,0% (рис. 9.8). Малая амплитуда колебаний кристалла в пределах 250 мкм не позволяет получить сплошной паяный шов под кристаллом. При дозах припоя более 150 имп. припой, растекаясь за пределы кристалла, эффективно заполняет все пространство под кристаллом. Паяный шов образуется без пор, пустот и щелей. Для обеспечения толщины паяного соединения кристалл—кристаллодержатель не менее 30 мкм необходимо увеличивать дозу припоя более 150 имп. и уменьшать амплитуду колебаний кристалла в процессе монтажа.

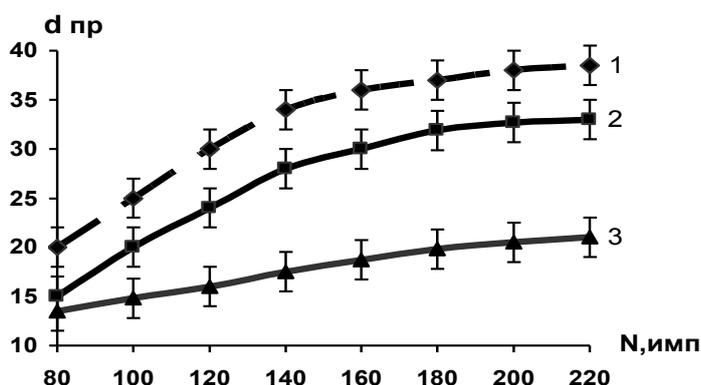


Рис. 9.8. Зависимости толщины припоя под кристаллом от дозы припоя ($N_{имп}$) при различной амплитуде колебаний: 1 – 250 мкм, 2 – 500 мкм, 3 – 750 мкм

Однако применение малых амплитуд вибраций имеет и отрицательное влияние. Так, при амплитуде менее 250 мкм качество паяного соединения ухудшается.

ся из-за образований локальных несмоченных припоем участков, располагаемых вблизи центральной части кристалла. При этом площадь непропаев может достигать 25–30% площади активной транзисторной структуры. Образующиеся неоднородности способствуют развитию тепловой неустойчивости однородного токораспределения, искажению теплового фронта и, за счет этого перегреву кристалла. В результате этого отмечается снижение процента выхода годных. Увеличение параметров вибрации по координатам x , y и амплитуды вибраций более 750 мкм приводит к эффективному растеканию припоя за пределами активной структуры. Толщина под кристаллом слабо зависит от дозы и не превышает уровня 15–22 мкм. При таких высоких уровнях вибрации припой под кристаллом имеет однородную структуру, благодаря этому обеспечивается равномерное распространение теплового потока, что способствует росту выхода годных до 98%.

При монтаже кристаллов с амплитудой вибраций 500 мкм образуется не только бездефектное паяное соединение как при $A_{xy}=750$ мкм, но достигается заданная толщина припоя в пределах 30–35 мкм. Качественное присоединение кристаллов позволяет получить стабильно высокий выход годных по электрическим параметрам.

Определены требования к величине силы удержания кристалла $F_{y\partial}$ на адгезионном носителе, оптимальная величина которой составляет 0,05 Н. Использование адгезионного носителя с $F_{y\partial}>0,05$ Н для кристаллов площадью 25 мм² требует более тщательной настройки работы механизма съема кристаллов. При этом с целью компенсации крутящего момента, приводящего к развороту кристалла или его сбрасыванию с вакуумной присоски, необходимо корректировать в сторону увеличения угла опережения движения иглы подкола. Это приводит к росту динамического воздействия иглы на кристалл и увеличения площади дефектов [5].

Для оценки эффективности выбранных технологических режимов автоматизированного монтажа кристаллов проведены сравнительные испытания приборов воздействием термоударов при $T = -196 \div +200$ °С, $n=100$ циклов с замером электропараметров $J_{кэж}$, $U_{кэ нас.}$, $U_{бэнас.}$, $R_{тлк}$, через каждые десять термоударов. Увеличение параметров вибрации A_{xy} в процессе монтажа кристаллов (рис. 9.9) приводит к снижению толщины припоя под кристаллом и снижению надежности приборов при термошоковых испытаниях из-за развития термомеханических напряжений в системе кристалл–припой–кристаллодержатель, приводящих к возникновению трещин в кристалле.

Внешний вид припоя под кристаллом после вибрационной пайки и травления приведен на рис. 9.10,а, а для пассивного процесса монтажа, при котором кристалл находится в состоянии статического равновесия под действием силы собственного веса (вариант напайки кристалла в конвейерной водородной печи) на рис. 9.10,б.

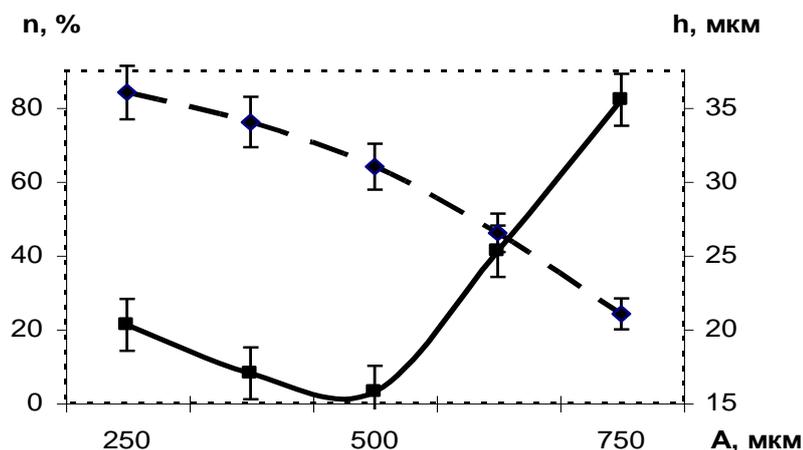


Рис. 9.9. Зависимости толщины припоя (1) и количества отказов (2) в соединении от амплитуды вибраций

Для пассивного монтажа характерно образование локальных пустот и непропаев под кристаллом, которые, являясь концентраторами, способствуют росту напряжений более чем в 2 раза после термоциклического воздействия (рис. 9.11). Это приводит также к ухудшению воспроизводимости по температуре перегрева кристалла, увеличивая ΔT_j до $(40-90)^\circ\text{C}$ и снижая выход годных. Для варианта автоматизированного процесса присоединения кристаллов выход годных составил до 98%, а $\Delta T_j = (40-55)^\circ\text{C}$.

Автоматизированный монтаж кристаллов вибрационной пайкой приводит к гомогенизации паяного соединения, исключению дефектов в виде пустот и непропаев в результате чего снижается уровень термомеханических напряжений активной структуры, снижается переходное тепловое сопротивление и повышается его воспроизводимость.

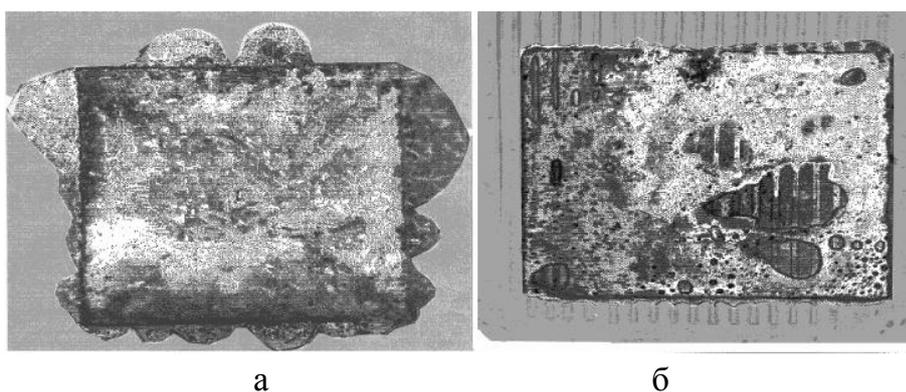


Рис. 9.10. Внешний вид припоя под кристаллом (кристалл удален травлением) при пайке на ЭМ4085-14М (а) и в печи ЖК4007 (б)

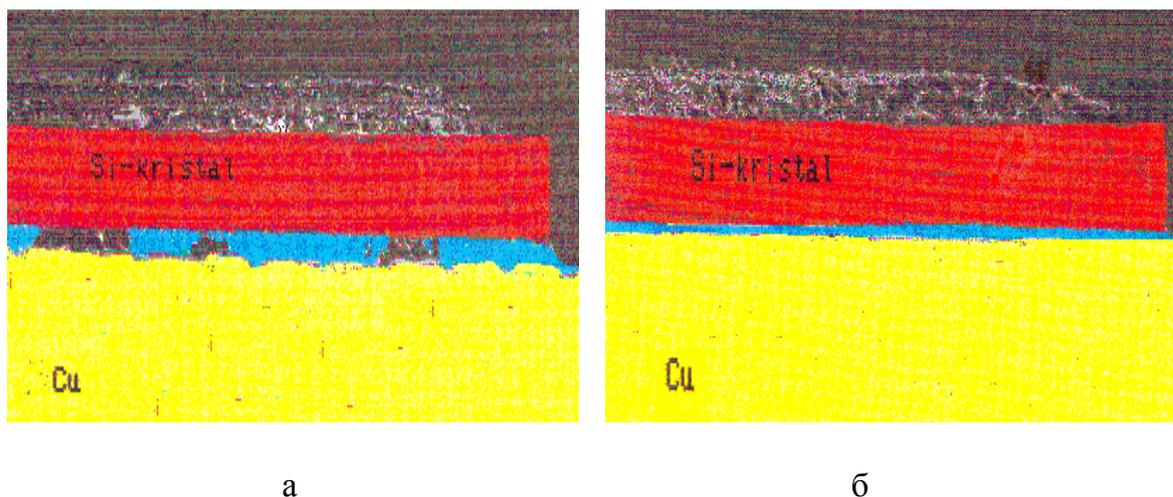


Рис. 9.11. Структура паяного соединения под кристаллом для пассивного (а) и активного процесса пайки (б)

При амплитуде колебаний кристалла 250–500 мкм по криволинейной замкнутой траектории происходит наиболее эффективное удаление окисных пленок и шлаков за пределы активной зоны, обеспечивая равномерную толщину припоя в соединении. Автомат ЭМ4085-14М позволяет осуществлять автоматизированный монтаж на припое кристаллов площадью 25 мм² вибрационной пайкой с высоким качеством соединений и изготавливать высоковольтные мощные транзисторы с выходом годных по электрическим параметрам до 98%. Для обеспечения высокой устойчивости к термоциклическим нагрузкам при $T = -196 \div +200^\circ\text{C}$ необходимо тщательно выбирать параметры вибрационной пайки и дозу припоя.

9.3. Монтаж кристаллов транзисторов в корпусе D-Pак и IGBT

При сборке транзисторов в пластмассовом корпусе для поверхностного монтажа с повышенной мощностью рассеивания (Discrete Power Device Package) (D-Pак) и Super D2-Pак (рис. 9.12) применяют посадку кристалла с помощью припойной прокладки. Для обеспечения заданной мощности $P_{\max} \leq 45\text{Вт}$ и низкого переходного теплового сопротивления р-п переход–корпус в качестве кристаллодержателя и теплоотвода применяют медные сплавы с теплопроводностью не хуже 350 Вт/м·°С. Однако использование в составе корпуса транзистора материалов, не совместимых по величине ТКЛР, приводит к необходимости ограничения тепловых воздействий в процессе монтажа. Различные технологии пайки поверхностного монтажа: волновая, ИК нагревом, в паровой фазе связаны с интенсивным нагревом тонкого пластмассового корпуса. При высоких тепловых нагрузках возникает опасность растрескивания корпуса и кристалла, возможность проникновения влаги внутрь корпуса и деградации характеристик транзистора.



а

б

Рис. 9. 12. Транзисторы в корпусах D-Pak (а) и Super D2-Pak (б)

Корпуса транзисторов для поверхностного монтажа (D-Pak) относятся к XIV группе по ГОСТ 20.39.405-84, и к ним предъявляются жесткие требования по воздействию режимов пайки и паяемости выводов:

1. Конструкция изделий должна обеспечивать трехкратное воздействие групповой пайки и лужения выводов горячим способом без теплоотвода при температуре пайки не выше 265°C в течение 4 с.

2. Изделия должны выдерживать групповую пайку одноразовым погружением корпуса в расплавленный припой при температуре до 265°C в течение до 4 с.

3. Выводы и контактные площадки изделий должны иметь гарантированную паяемость с использованием спиртоканифольных неактивированных и некоррозионных слабоактивированных флюсов.

Методы монтажа кристаллов на выводные рамки: пайкой эвтектическими сплавами или легкоплавкими припоями, посадкой на токопроводящую композицию должны обеспечить высокую прочность соединений при термоциклировании и механических нагрузках, низкое электрическое и тепловое сопротивление, минимальное механическое воздействие на кристалл и отсутствие загрязнений. Если кристаллы приборов имеют значительную мощность рассеяния (более 0,5 Вт), то между подложкой кристалла и посадочной площадкой выводной рамки необходимо создать токопроводящий электрический контакт с незначительным электрическим и тепловым сопротивлением, что достигается использованием методов пайки.

Внутренние напряжения, возникающие в процессе присоединения кристалла к подложке, определяются не только физическими параметрами соединяемых материалов, температурой процесса, но также и соотношением толщины кристалла к толщине подложки. Расчет напряжений сжатия на поверхности кристалла показал, что при монтаже кремниевых кристаллов на основания из медного сплава, возникают внутренние напряжения, которые могут превышать допустимый уровень напряжения изгиба кремния (250 МПа), в результате чего возникают микротрещины в кристалле. Выбор оптимальной толщины кристалла в

пределах 200–250 мкм при $h_1/h_2=0,4-0,5$ позволяет уменьшить возникающие деформации (рис. 9.13).

Для установления влияния различия ТКЛР кремниевого кристалла и кристаллодержателя из медного сплава БрХ исследовались транзисторные структуры размером 2,7x2,7x0,3 мм с напыленной на непланарную сторону системой металлизации Ti-Ni-Sn-PbSn-Sn. Оптимальное соотношение компонентов системы металлизации и припоя выбрано с учетом температуры присоединения внутренних проволочных соединений методом термозвуковой сваркой золотой проволокой при 250°C. Этому условию в соответствии с диаграммой состояния Pb-Sn отвечает композиция, содержащая 85% свинца. Трехслойная композиция Sn-SnPb-Sn выбрана, как наиболее эффективная система, обеспечивающая смачивание припоем поверхности никеля на непланарной стороне кристалла и серебра на кристаллодержателе. Толщина слоя олова составляет 2 мкм со стороны никеля и 1 мкм на наружной поверхности. Расчетное значение толщины свинца:

$$h_2 = \frac{A \cdot \gamma_1 \cdot h_1}{(100 - A) \cdot \gamma_2}, \quad (9.6)$$

где h_1, h_2 – толщина слоя Sn и Pb соответственно; γ_1, γ_2 – уд. вес Sn и Pb соответственно; A – требуемое содержание Pb в припое.

Уменьшение толщины слоя Sn до 2 мкм приводит к снижению толщины слоя Pb до 7,2 мкм, таким образом, варьирование толщиной слоев Sn в пределах 2–3 мкм и Pb в пределах 7,2–10,8 мкм позволяет получить припойную композицию с температурой плавления 250–270°C. С учетом допуска $\pm 0,5$ мкм толщина Sn составила: 1 слой–1,5 мкм, 2 слой–0,5 мкм, толщина Pb 7,2–10,8 мкм, а общая толщина припоя 9,2–13,8 мкм.

Исследовано влияние конструктивных и технологических факторов (толщина паяного соединения кристалл–кристаллодержатель; наличие демпфера между кристаллом и пластмассовой частью корпуса в виде эластичного компаунда; режимы зачистки облоя на теплоотводящей поверхности кристаллодержателя) на устойчивость транзисторов в корпусе D-Pak к температурным ударам, возникающих в процессе поверхностного монтажа [6].

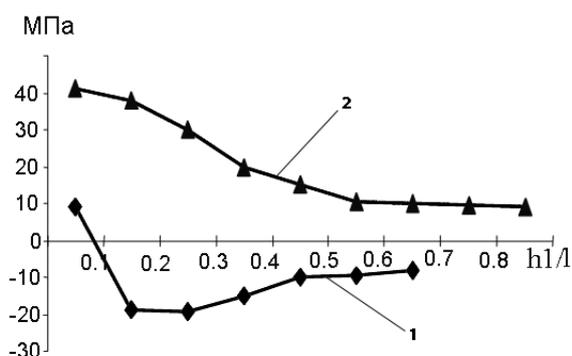


Рис. 9.13. Механические напряжения в кристалле: 1 – напряжение растяжения, 2 – напряжение сжатия

Металлизация Ti-Ni осаждалась в установке 01НИ-7-015 непрерывного действия с магнетронной системой распыления и использованием мишени из никеля марки Н-0 и титана ВТ1-0 толщиной листа 6–10 мм. Припойная композиция Sn–PbSn–Sn осаждалась в установке электронно-лучевого испарения «Оратория-9». Для сборки транзисторов применялась выводная рамка из материала БрХ с полосой серебра толщиной 7 ± 1 мкм. Монтаж транзисторных структур на легкоплавкую припойную композицию выполнялся на автомате ЭМ4085-03 при температуре 300–400°C; амплитуда колебаний кристалла 25–200 мкм; количество периодов колебаний 2–10.

Качество монтажа кристаллов определялось по внешнему виду до и после воздействия разрушающей нагрузки, прикладываемой перпендикулярно боковой поверхности кристалла. Пайка считалась удовлетворительной, если разрушение происходило по кремнию и не менее чем 80% площади кристалла занято кремнием. Это требование подтверждалось результатами контроля переходного теплового сопротивления «р-п переход-корпус» ($R_{\text{ТПК}}$) на зондовом устройстве.

При малых амплитудах вибрации (25–50 мкм) при монтаже без защитной атмосферы не происходит полного удаления оксидов из зоны пайки и образуются участки с непропаями, приводящими к росту теплового сопротивления. Это особенно заметно в случае пайки кристаллов при температурах до 300° (рис. 9.14). Увеличение температуры монтажа кристаллов до 390°C, а амплитуды колебаний до 75–150 мкм способствует эффективному удалению оксидов, что исключает пустоты и непропаи под кристаллом и позволяет получить требуемый уровень переходного теплового сопротивления.

Монтаж кристаллов на легкоплавкий припой вибрационной пайкой на автомате ЭМ–4085 приводит к гомогенизации паяного соединения, исключению дефектов в виде пустот и непропаев. В результате снижаются уровень термомеханических напряжений в активной структуре, переходное тепловое сопротивление и повышается производительность монтажа.

При сборке транзисторов опробован вариант с увеличенной толщиной паяного соединения за счет использования дополнительной прокладки припоя ПОС 10 толщиной 50 мкм. Нанесение эластичного демпфирующего слоя компаунда СИ-ЭЛ 159-322Б на поверхность кристалла после формирования проволочных перемычек, выполнялось на автомате ЭМ–4085 с применением стандартного дозатора. После выполнения каждой технологической операции проводился контроль кристаллов по внешнему виду на наличие трещин.

После герметизации на рамках осуществлялось удаление перемычек микрофрезой и освобождение эмиттерного и базового выводов от связующей кромок рамки, с последующим контролем ВАХ каждого прибора и после каждой операции. В результате последовательного операционного анализа установлено, что трещины в кристалле возникают в процессе герметизации.

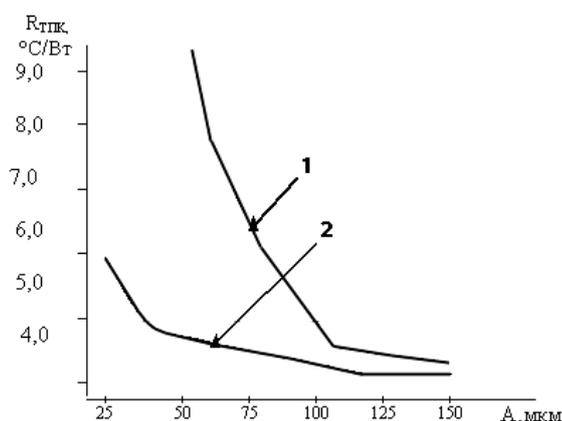


Рис. 9.14. Влияние режимов монтажа кристаллов на тепловое сопротивление кристалл–рамка при 300 °C (1) и 390 °C (2)

Анализ характерного расположения трещин на кристалле (рис. 9.15) указывает на то, что растрескивание кристаллов происходит при герметизации в процессе смыкания прессформы на отдельных гнездах матрицы из-за несоответствия величины перепада на формованной части рамки и матрицы прессформы.

При глубине формовки коллекторного вывода $1 \pm 0,07$ мм на рамке фактическое несоответствие глубины перепада на элементах матрицы прессформы достигает $\Delta_{\max} = 0,25$ мм. Это приводит к тому, что в процессе смыкания верхней и нижней частей прессформы происходит деформация плоскости кристаллодержателя и пластическая деформация зоны пайки кристалла с последующим образованием трещины в кристалле.

Трещины в кристалле отсутствовали для вариантов сборки транзисторов с защитой кристалла эластичным демпфирующим слоем и с дополнительным демпфирующим слоем припоя. В этих вариантах в результате уменьшения глубины перепада на элементах прессформы происходит снижение внутренних напряжений в кристалле и устраняются трещины в нем.

При герметизации корпуса пластмассой на теплоотводе образуется облой повышенной толщины, достигающей 40–50 мкм, что создает значительные трудности по его удалению шлифовальным кругом на плоскошлифовальном станке и может являться причиной возникновения дополнительных механических напряжений в кристалле.

При зачистке облая необходимо исключить возможность грубого заглабления шлифовального круга в материал выводной рамки. В этом случае происходит перегрев кристаллодержателя, что заметно по изменению его цвета, а механическая деформация поверхностного слоя, передаваемая в кристалл, приводит к возникновению механических напряжений, способных привести к его растрескиванию. Неоднократные эксперименты при различных режимах зачистки облая шлифовальным кругом показали высокую эффективность применения дополнительного защитного эластичного компаунда, наносимого на поверхность кристалла.

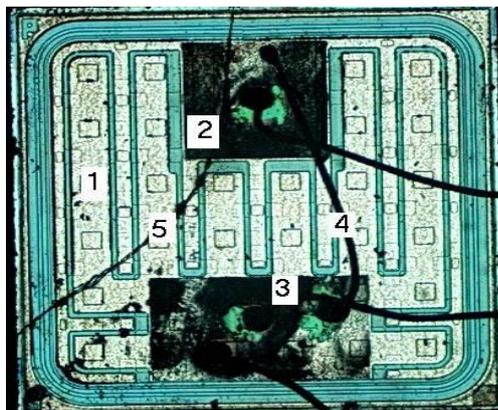


Рис. 9.15. Внешний вид дефектов кристалла: 1 – кристалл, 2,3 – контактные площадки, 4 – проволочное соединение, 5 – трещина

Оптимальный вариант конструктивно-технологического исполнения мощных транзисторов в корпусе D-Pak, предназначенных для поверхностного монтажа (толщина припоя не менее 8 мкм, посадка кристалла на легкоплавкий припой вибрационной пайкой, защита кристалла эластичным компаундом, глубина формовки в пределах не хуже $\pm 0,07$ мм), обладает высокой надежностью в условиях температурных воздействий групповой пайки.

В современных условиях наиболее качественное преобразование электроэнергии при максимальной компактности и надежности устройств обеспечивается электронными модулями на базе управляемых силовых полупроводниковых приборов с изолированным затвором (IGBT — Insulated Gate Bipolar Transistor) с высокой степенью интеграции. Повышенный интерес к IGBT объясняется чрезвычайно малой мощностью управления и высоким быстродействием, что позволяет создавать на их основе компактные силовые устройства с частотой переключения до нескольких десятков кГц.

IGBT являются продуктом развития технологии силовых транзисторов со структурой металл–оксид–полупроводник, управляемых электрическим полем (MOSFET) и сочетают в себе два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный (образующий силовой канал) и полевой (образующий канал управления). Таким образом, IGBT имеет три внешних вывода: эмиттер, коллектор, затвор. Соединения эмиттера и стока, базы и истока являются внутренними. Сочетание двух приборов в одной структуре позволило объединить достоинства полевых и биполярных транзисторов: высокое входное сопротивление с высокой токовой нагрузкой и малым сопротивлением во включённом состоянии [7].

Для IGBT применяют новые корпуса - Super-220 и Super-D2Pak, которые имеют такую же топологию и расстояние между выводами, что и стандартные, но содержат кристаллы значительно больших размеров. Super-220 имеет топологию TO-220, но в нем размеры кристалла увеличены почти вдвое, что обеспечивает ток до 95 А, что на 20 А больше. Корпус допускает поверхностный мон-

таж и крепление зажимами. Super-D2Pak имеет топологию D2Pak, но содержит кристалл на 40% больше и допускает ток до 95 А. Мощные IGBT в металлокерамическом корпусе работают в режиме коммутации больших токов, поэтому наиболее распространенной причиной их катастрофического отказа является вторичный пробой вследствие локальных участков структуры с аномально высокой температурой и повышенного теплового сопротивления «р-п переход-корпус» за счет дефектов в припое под кристаллом.

С целью повышения эксплуатационной надежности приборов оптимизирован процесс их сборки [8]. Кристаллы IGBT изготавливались с двумя типами металлизации – Ti-Ni-V-Ag и V-Au на непланарной стороне. Напыление металлизации Ti-Ni-Ag осуществлялось магнетронным способом на установке «Магна 2М», металлизации V-Au – на установке «Оратория 9», подслоя V– электронно-лучевым методом, золота–термическим испарением с использованием резистивного испарителя. Монтаж кристаллов на автомате ЭМ–4085 повысил эффективность образования эвтектики Au-Si за счет активации процесса присоединения в результате принудительного движения кристаллов по криволинейной замкнутой траектории, обеспечиваемой программируемыми параметрами вибрации. При амплитуде колебаний кристалла 250 мкм за 8–10 периодов колебаний происходит эффективное удаление окисных пленок и шлаков за пределы активной зоны, обеспечивая равномерную толщину эвтектики в соединении при температуре 450–460°C и усилии нагружения – 1,45 Н. Монтаж кристаллов на эвтектику Au-Si и на припой при оптимальных температурах обеспечивает равномерное растекание эвтектики по всему периметру кристалла без пор и непропаев.

Исследованиями на рентгенотелевизионном микроскопе установлено, что пассивный монтаж кристаллов на припой в конвейерной печи характеризуется наличием дефектов в виде непропаев и пустот в припое до 10–25% от площади кристалла, а для варианта монтажа на эвтектику дефектность не превышает 5%. В процессе коммутации на индуктивную нагрузку наибольшие изменения теплового сопротивления выявлены для варианта монтажа на припой. В процессе испытаний имеется температурный градиент вследствие распространения тепла от кристалла к подложке, поэтому даже при равенстве ТКЛР кристалла и подложки наблюдается разность деформаций, вызывающей достаточно большие растягивающие усилия в паяном соединении и приводящей к его разрушению. В случае монтажа кристаллов на эвтектику приборы выдерживают испытания без усталостного разрушения паяного соединения, в результате чего тепловое сопротивление почти не изменяется. Таким образом, для обеспечения устойчивости мощных IGBT транзисторов к циклическому воздействию электрической мощности необходимо осуществлять монтаж кристаллов на эвтектику Au-Si при оптимальной температуре.

9.4. Бессвинцовые припойные композиции для монтажа кристаллов

Для сборки мощных полупроводниковых приборов в корпусах ТО-92, ТО-126 используют припойные композиции, которые послойно наносят на непланарную поверхность кристаллов. Основным недостатком припойной композиции: $\text{Sn}_{2\pm 0,5} - \text{Pb}_{8\pm 1} - \text{Sn}_{1\pm 0,5}$ является наличие свинца, обладающим высокой токсичностью ($\text{ПДК}=0,01\text{мг/м}^3$). Для монтажа кристаллов в корпус International Rectifier, Motorola, Esec и др. широко применяют бессвинцовые припои: олово-серебро и олово-серебро-медь. Проволочный припой $\text{Sn}_{65}-\text{Ag}_{25}-\text{Sb}_{10}$ и двухкомпонентный эвтектический состав $\text{BiAg}_{2,6}$ с температурой плавления 262°C пригодны для монтажа кристаллов и последующей разварки золотых проволочных выводов термовзвучковой сваркой. Однако эти припои характеризуются повышенным значением теплового сопротивления и для мощных приборов их использование нецелесообразно.

Бессвинцовые паяльные композиции не смачивают поверхность так же хорошо, как припой Sn63/Pb37, который растекается тонким и широким слоем. Исследования показали, что, припои Sn63/Pb37 имеют растекаемость 93%, у бессвинцовых этот параметр варьируется от 73 до 77%. [9]. Применение бессвинцовых припоев приводит к изменению сборочных процессов и технологии пайки. Необходима корректировка режимов пайки, а также испытания бессвинцовых паяных соединений на прочность, тепловое сопротивление, коррозионную стойкость и др. Для обеспечения надежности паяных соединений, наряду с выбором оптимальных способов и режимов пайки, необходимо учитывать состав и свойства припоев, которые должны:

- обеспечивать хорошую паяемость с полупроводниковыми кристаллами и свариваемость с внутренними проволочными выводами;
- сохранять способность к пайке и сварке при заданном сроке хранения; обеспечивать антикоррозионную защиту;
- не подвергаться иглообразованию при хранении и разрушению при температурах сборки, испытании и эксплуатации.
- обеспечивать минимальное переходное электрическое сопротивление;
- быть устойчивыми к тепловому удару при монтаже приборов на печатные платы пайкой, к химическим реагентам, используемым в процессе сборки.

Основными конструктивно-технологическими особенностями приборов в пластмассовых корпусах типа КТ-26 (ТО-92), КТ-27 (ТО-126), КТ-89, КТ-92 (D-Pak, I-Pak) являются следующее:

- применение кристаллов, содержащих на непланарной поверхности слой золота толщиной 1,75 мкм (для кристаллов с малым размером – не более 0,5x0,5мм, приборы в корпусе КТ-26);
- применение рамок выводных из лент медного сплава для КТ-26 (латунь Л-68), для КТ-89, КТ-92 (бронза БрХ), меди для КТ-27 (МЗР) и многослойной плакированной ленты МЖМ, на поверхности которых в зоне монтажа кристаллов и

разварки выводов содержится слой серебра, толщиной 3–5 мкм для гальванического покрытия и 5–7 мкм для холодного плакирования;

– выполнение монтажа кристаллов: контактно-реактивной пайкой с образованием трехфазной эвтектики Au-Si-Ag, при температурах порядка 440-460°C (для кристаллов с малым размером – не более 0,5x0,5мм, приборы в корпусе КТ-26); пайкой на припойную композицию $\text{Sn}_{2\pm 0,5} \text{Pb}_{8\pm 1} \text{Sn}_{1\pm 0,5}$, наносимую на обратную сторону кристаллов.

Основные требования к системам металлизации непланарной поверхности пластин заключаются в следующем:

1. Высокая электропроводность проводящих элементов металлизации.
2. Низкая величина удельного переходного сопротивления невыпрямляющего контакта.
3. Высокая адгезия к полупроводнику и другим контактирующим слоям.
4. Согласованность ТКЛР полупроводника и контактирующих слоев.
5. Возможность образовывать эвтектическое присоединение кристалла с материалом покрытия корпуса.
6. Высокая технологичность процесса формирования металлизации.
7. Возможность автоматизации производства монтажа кристалла в корпус.

Перед напылением системы металлизации пластины проходят ряд операций по механическому утонению методом шлифовки связанным абразивом непланарной поверхности с толщины 420 мкм до 270 ± 20 мкм. После утонения кремниевые пластины подвергаются процессам отмывки и последующей химической обработки в растворе HF. Затем на непланарную поверхность пластин методом вакуумной конденсации послойно наносится металлизация $\text{V}_{0,05}\text{-Au}_{1,75}$. (рис.9,16, а) или Ti-NiV-Ag-Sn-Pb-Sn (рис. 9.16, б). В качестве основы корпусов используются рамки выводные, полученные из ленточного плакированного материала, содержащим полосу серебра (рис. 9.17). В основе рамки выводной содержится медь или медный сплав, что крайне важно при изготовлении приборов с рассеиваемой мощностью более 0,5 Вт. Но такие материалы имеют высокий уровень коэффициента термического линейного расширения (КТЛР) в пределах $(18-20)10^{-6}1/^\circ\text{C}$.

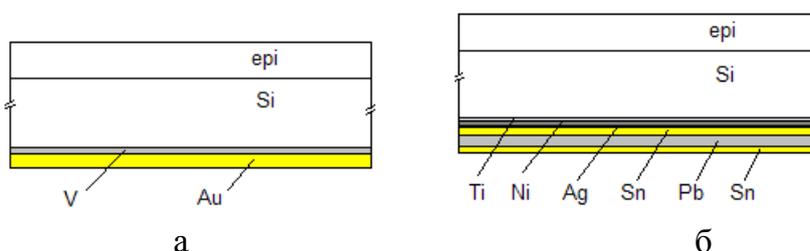


Рис. 9.16. Структура металлизации на непланарной поверхности кристаллов с золотом (а) и с припойной композицией (б)

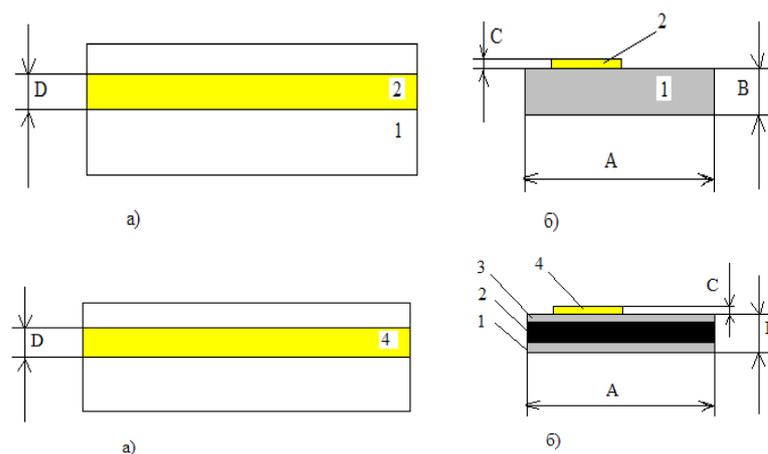


Рис. 9.17. Ленточный плакированный материал, содержащий полосу серебра (для корпусов КТ-26, КТ-89, КТ-92-а) (а) вид сверху; (б) поперечное сечение: 1— основа (медный сплав); 2— полоса серебра; (для корпуса КТ-27 (а) вид сверху; (б) поперечное сечение: 1— медь; 2— основа (сталь 08КП); 3— медь; 4 — полоса серебра

Поэтому рассогласование по ТКЛР приводит к значительным механическим напряжениям в активной структуре полупроводникового прибора, уровень которых может превысить предел прочности кремния. Термомеханические напряжения в кристалле, возникающее после его монтажа в корпус, могут достигать 180–240 МПа.

Для снижения внутренних напряжений в активной структуре, напаянной на медную рамку, требуется увеличивать толщину паяного соединения под кристаллом. Таким образом, при использовании рамки из медного сплава требуется конструкция кристалла, которая должна содержать на непланарной поверхности демпферный слой припойной композиции для предотвращения неконтролируемого роста внутренних напряжений в напаянном кристалле и исключения его растрескивания.

Для сборки полупроводниковых приборов используют бинарную систему Sn-Ag в качестве припоя. Сравнивая бинарную Sn-Ag с тройной системой Sn-Ag-Cu (или Sn-Ag-Sb) предпочтение отдано первой, как наиболее простой и дешевой (для систем Sn-Ag-Cu или Sn-Ag-Sb потребовалась специальная мишень).

При расчете толщины припойной композиции необходимо исходить из условия обеспечения устойчивости приборов к температурному воздействию при испытаниях на теплоустойчивость при 260°C. Из диаграммы фазового состояния системы Sn-Ag следует, что при содержании серебра по массе 3% образуется эвтектический сплав с температурой плавления 221°C. Для получения сплава с температурой ликвидуса более 260°C, например, 300°C потребуется вводить серебро в количестве 20 мас. %.

Для припойной композиции, наносимой путем распыления в вакууме на установку «Оратория-9», необходимо определить ее толщину исходя из заданной системы металлизации, размера кристалла и режимов вибрационной пайки. Для

приборов в пластмассовых корпусах с размером кристаллов до $2,5 \times 2,5$ мм² толщина паяного соединения под кристаллом рекомендуется 7–8 мкм.

В процессе вибрационной пайки с заданием амплитуды колебаний кристаллу по осям X, Y в пределах 150–200 мкм расходуется до 25% припоя на смачивание поверхности серебряного покрытия на рамке, поэтому общая толщина припойной композиции составляет 10 ± 2 мкм. Толщина слоя серебра при заданном содержании олова определяется как:

$$h_{Ag} = \frac{A \cdot \gamma_{Sn}}{(1-A) \cdot \gamma_{Ag}} \cdot h_{Sn} \quad (9.7)$$

где h_{Ag} , h_{Sn} – толщина слоев Ag и Sn соответственно; γ_{Ag} , γ_{Sn} – удельный вес Ag и Sn соответственно; A – требуемое содержание Ag в припое.

Для достижения температуры ликвидуса 300°C при толщине олова 10 ± 2 мкм и с учетом минимальной толщины паяного соединения 7,0 мкм толщина серебра должна быть не менее 1,0 мкм.

Для оптимизации свойств припойной композиции изготовлены пластины полупроводниковых приборов с металлизацией Ti-Ni и напылением слоев олова и серебра в различном соотношении. Электронно-лучевое нанесение олова толщиной 8–12 мкм выполнено на установке «Оратория-9», а магнетронное напыление серебра – на установке «Магна-2М», где варьирование толщины серебра от 0,2 до 1,5 мкм достигалось изменением мощности магнетрона [10].

С помощью Оже-спектрометра установлена неравномерность распределения элементов припойных композиций Ag1,5 – Sn9 – Ag1,5 и Ag1,5 – Sn9 (рис. 9.18) по глубине до 12 мкм от поверхности. Так, содержание олова в зависимости от глубины слоя изменяется от 75 до 52%, что приводит к нарушению стехиометрического состава композиции, неконтролируемому изменению температуры ее плавления, и в итоге, к невозможности процесса сборки.

С увеличением толщины серебра от 0,2 до 1,5 мкм наблюдается укрупнение кристаллической структуры по направлению от базового среза и выше (рис. 9.19,а, б). Это указывает на то, что температура по площади пластины неравномерная – возле базового среза температура меньше и растет с удалением от базового среза. Из-за перегрева пластины на противоположной области от базового среза происходит оплавление припойной композиции, а ее поверхность становится рельефной и бугристой (рис. 9.19,а). Для вариантов с верхним слоем, состоящим только из олова, структуры кристаллитов не выявлены, поверхность композиции была однородной.

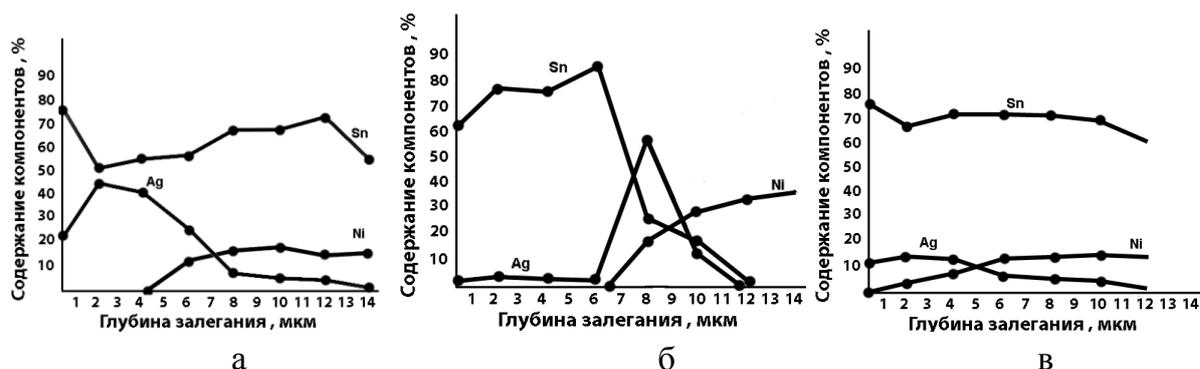


Рис. 9.18. Распределение содержания компонентов по глубине композиции Ag1,5 – Sn9 – Ag1,5(а), Ag1,5 – Sn9 (б), Ag0,2 – Sn9 – Ag0,2 (в)

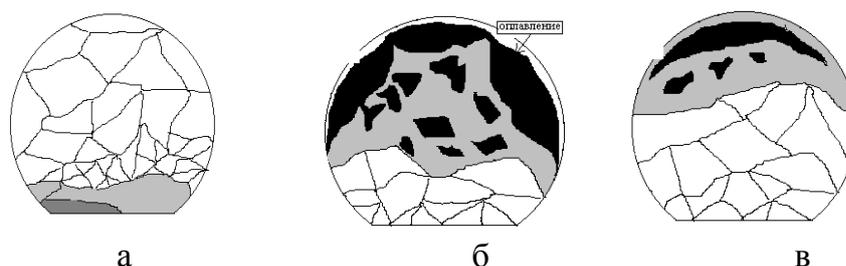


Рис. 9.19. Структура верхнего слоя припойной композиции: Ag0,2 – Sn9 – Ag0,2 (а), Ag1,5 – Sn12 – Ag1,5 (б), Ag1,5 – Sn9 – Ag1,5 (в)

Напайка кристаллов на выводную рамку, содержащую полосу серебра толщиной 4–6 мкм, проводилась на автомате ЭМ 4085 вибрационной пайки при температуре 330°C и давлении 80 г, количестве колебаний в секунду – 4 и на автомате ЭМ– 4105 при 360°C. Качество напайки кристаллов для всех вариантов соответствовало требованиям процесса – равномерное растекание припоя по всему периметру, щели и непропаи отсутствовали. Прочность сцепления кристаллов с рамкой соответствовала техническим требованиям, при воздействии нагрузки на кристалл отслаивания его не происходило.

Разварка межсоединений выполнена на автомате ЭМ–4060Т2 золотой проволокой диаметрами 40 мкм и 25 мкм для КТ315. При выборе более низкой температуре разварки (для исключения отслоения кристаллов) наблюдались дефекты в виде отслаивания и непровары сварных точек. Основной вид брака характеризовался превышением напряжения $U_{кэн} > N$. Как видно из рис. 9.20, толщина припоя под кристаллом составляет 3,5–7,0 мкм для вариантов, содержащих двухслойное серебро Ag–Sn–Ag, а для однослойного серебра Ag–Sn толщина паяного соединения составила 10,5–12,0 мкм.

Анализ брака выявил такие дефекты, как сколы, смещения кристалла, отслаивание проволочных соединений. В результате опробования двухкомпонентной системы Sn–Ag в качестве бессвинцовой припойной композиции для сборки полупроводниковых приборов установлено, что неравномерность распределения элементов припойной композиции по глубине нарушает стехиометрический состав припойной композиции и изменяет температуру ее плавления, способствуя невос-

производимости процесса сборки. Для устранения этого необходима оптимизация режимов магнетронного распыления компонентов.

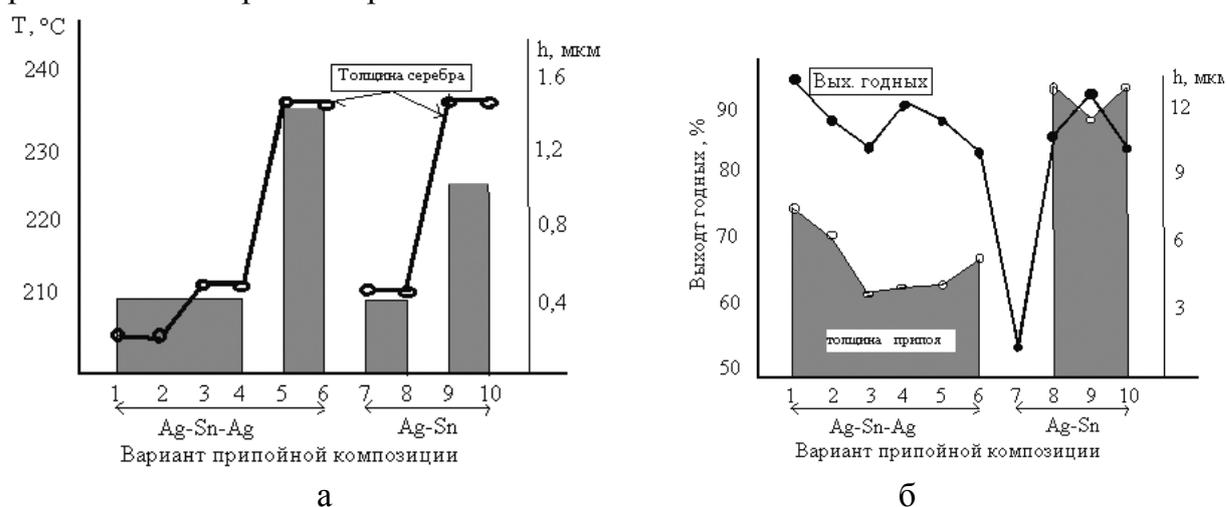


Рис. 9.20. Влияние состава припойной композиции и толщины серебра на температуру разварки выводов (а) и выход годных приборов (б)

Увеличение мощности магнетронного напыления Ag толщиной 1,5 мкм вызывает неравномерный перегрев пластин по площади и оплавление припойной композиции. При разварке золотых выводов возникают трудности, связанные с необходимостью подбора более низкой температуры, при этом более предпочтительны варианты, содержащие серебро толщиной 1,5 мкм. Поскольку бессвинцовые припои имеют меньшую смачиваемость и текучесть, чем эвтектические оловянно-свинцовые, то для улучшения текучести требуются либо защитная атмосфера, либо вибраций в зоне монтажа кристаллов.

9.5. Монтаж жесткими объемными выводами

Стоимость присоединения проволочных выводов составляет большую часть общей стоимости, поэтому потребность в автоматизации этого процесса очень велика и продолжает расти с увеличением степени интеграции ИС. Стоимость присоединения кристалла ниже стоимости присоединения проволочных выводов, но по мере усложнения схемы она растет. Кроме того, сам кристалл БИС очень дорог, поэтому для повышения производительности сборочных операций и выхода годных необходимо обеспечить полную автоматизацию присоединения кристаллов и выводов.

Одним из необходимых условий для реализации беспроводного метода является создание на кристаллах ИМС специальных контактных выступов в виде балок или шариков. Технологический процесс производства ИС с объемными выводами состоит из следующих основных стадий:

– на пластине кремния изготавливаются с использованием стандартных планарных методов требуемые полупроводниковые приборы, для чего используются специальные фотошаблоны, в которых изменена геометрия контактных окон;

– для защиты планарной структуры от механических и химических воздействий в процессе изготовления сборки и эксплуатации на поверхность структуры наносят дополнительные защитные слои диэлектриков, например, SiO_2 , Si_3N_4 ;

– изготавливаются металлические контакты к структуре и объемные выводы, выступающие над кристаллом (шарики) или за пределы кристалла (балки), сразу ко всем контактам всех структур на пластине, например, электроосаждением металлов, оплавлением либо раскладкой готовых шариков через трафарет.

Отказ от индивидуальной термокомпрессии и замена ее групповой операцией осаждения выводов на всей пластине обеспечивает основное экономическое преимущество объемных выводов по сравнению с проволочными выводами, уменьшение затрат ручного труда. Готовая пластина разрезается на отдельные приборы, которые затем поступают на сборку в ГИС или БИС. Качество и механическая прочность объемных контактов выше, чем при индивидуальной термокомпрессии, поскольку в конструкциях отсутствуют длинные резонансные элементы, что очень важно для применения в авиационной и космической технике.

Существующая технология предусматривала создание шариковых выводов на всей пластине. В случае ТТЛ ИС или КМОП, для которых выход годных на пластине достаточно высок, такой подход оправдан. Однако для более сложных приборов с низким выходом годных на пластине стоимость создания шариковых выводов для всех структур на пластине при условии использования только небольшого процента годных структур может оказаться столь высокой, что она сведет на нет экономию, связанную с использованием ленты-носителя. Метод фирмы Mostek заключается в том, чтобы шариковые выводы создавать не на пластине, а на ленте. Для БИС с невысоким процентом выхода годных этот метод экономически себя оправдывает. Кроме того, лента с шариковыми выводами может быть использована для сборки стандартных кристаллов со структурами ИС.

Для монтажа в гибридные ИС крупногабаритных кристаллов, особенно если в качестве платы используется материал с КТР, значительно отличающийся от КТР кремния, могут быть рекомендованы ИС с припойными столбиковыми выводами. В методе сборки приборов “Unibond” фирмы Fairchild Semiconductor для соединения кристалла с внешними выводами используются кристаллы с шариковыми выводами с контролируемой деформацией и система балочных выводов для присоединения к внешней рамке.

Изготовление ИС по методу “Unibond” начинается с формирования шариковых контактов диаметром 125 мкм на контактных площадках кристалла. Этот процесс, в ходе которого создаются двухслойные шариковые контакты, проводится сразу на всех структурах до скрайбирования пластины. Двухслойная структура шариковых контактов гарантирует, что в процессе прохождения кри-

сталла и рамки с выводами через печь шарики деформируются на заданную величину. После изготовления шариковых контактов пластина скрайбируется и кристаллы помещаются в кассету с 10 углублениями, которая вибрирует, смещая кристаллы к определенным углам гнезд. Затем на кристаллы, расположенные лицевой стороной вверх, накладывают рамки с выводами.

Рамки представляют собой штампованные детали круглой формы, содержащие прямые металлические "балки", расходящиеся радиально от расположенного в центре кристалла. На рамку с выводами накладывается груз, и вся сборка - кассета, кристаллы, лента, в которой отштампованы рамки с выводами, и грузы пропускается через конвейерную печь.

Контролируемая деформация расплавляющегося верхнего слоя шариковых контактов допускает несколько неточное совмещение кристалла и рамки с выводами. При расплавлении этого слоя поверхностное натяжение расплава стремится установить рамку в правильное положение. Когда приборы выходят из печи, они заливаются в пластмассовые "таблетки". На этом этапе изделие может использоваться само по себе или монтироваться в гибридные ИС. Помимо этого, оно может поступать дальше в технологический цикл для завершения сборки по системе "Unibond". Если таблеточный корпус поместить на облуженную рамку с выводами, размеры которой соответствуют стандартному корпусу с двухрядным расположением выводов, и пропустить через печь, то все выводы таблеточного корпуса соединятся с внешними выводами, а прибор можно будет поместить в пластмассовый корпус типа DIP.

Система "Unibond" не только исключает дорогую и не очень надежную проволочную сборку но и обладает дополнительными преимуществами. Прежде всего готовый прибор может рассеять на 25% больше тепла, чем прибор в корпусе DIP. Это связано с тем, что балочные выводы больше по размерам, чем обычно используемые проволочки диаметром 25 мкм. Поэтому через них могут проходить большие токи. При использовании системы "Unibond" сборка прибора с 14-16 выводами, расположенными в два ряда, ускоряется примерно в 50 раз по сравнению с ручной. Пластмасса для таблетки подбирается таким образом, чтобы она защищала кристалл, а пластмасса для наружного корпуса - так, чтобы обеспечивала устойчивость к внешним воздействиям. В результате приборы становятся более надежными, чем с проволочными выводами, а экономия времени на операциях сварки и контроля составляет до 50 раз.

В ИС с балочными выводами, разработанными фирмой Bell Telephone Laboratories, система проводников, полученных осаждением золота, не только служит для соединения отдельных компонентов схемы друг с другом, но и обеспечивает связь ИМС с внешними схемами и устройствами. Золотой балочный вывод имеет относительно большую толщину (12 мкм) и выступает за границы кремниевого кристалла подобно консольной балке. Выступающий конец балочного вывода служит для присоединения к контактной площадке монтажной платы или подложки.

Открытые площадки ИС соединяются друг с другом при помощи золотых выводов, осажденных электролитическим путем поверх структуры, состоящей из последовательных слоев силицида платины, титана и платины. Силицид платины обеспечивает хороший омический контакт с кремнием, обладающий малым переходным сопротивлением, слой титана служит для обеспечения хорошей связи расположенного над ним слоя платины с нитридом, покрывающим поверхность кремния по сторонам от контактной площадки, а платина защищает расположенные под ней слои от миграции золота. Для приборов с балочными выводами достигнут выход годных, равный 99% по механическим и более 90% по электрическим параметрам.

Метод фирмы AEG-Telefunken напоминает известную сборку с помощью паучковых выводов, но имеет ряд существенных отличий: использование выращенных гальванически на контактных площадках золотых "шариков"; металлизация слоями титана, вольфрама и золота; облуженная никелевая рамка с "паучковыми" выводами, служащая для соединения кристалла с выводами корпуса; теплопроводящий клей на основе эпоксидной смолы для крепления кристалла в корпусе.

В методе "Sicon" для "паучковых" выводов использовался луженый никель, который дает возможность осуществлять пайку твердым припоем, что в свою очередь исключает упрочняющее покрытие смолой. Прочность контактов на отрыв в 10 раз больше значений, полученных при приварке проволочных выводов диаметром 25 мкм.

Фирма AEG-Telefunken, разработавшая метод "Sicon", в широких масштабах применяет металлизацию на основе системы титан-вольфрам-золото. По сравнению с алюминием металлизация на основе тяжелых металлов уменьшает электромиграцию по крайней мере на два порядка величины и позволяет избавиться от проблемы "пурпурной чумы". Это явление при приварке проволочных выводов вызывается образованием интерметаллических соединений алюминия с золотом, что накладывает серьезные ограничения на температурный диапазон работы приборов.

Наиболее успешным методом обработки пластин при автоматизированном соединении на ленточном носителе является создание столбиков из золота, полученных электролитическим осаждением, или меди, покрытой золотом, на алюминиевых контактных площадках кристалла при его монтаже на одно-, двух- и трехслойной ленте (рис. 9.21) [11]. Критической стадией, влияющей на выход годных приборов, является селективное травление слоев, полученных методом вакуумного испарения или ионного распыления. При химическом травлении травитель может проникать в пассивирующее покрытие и растворять легкокорродирующее алюминиевое межкомпонентное соединение. Для избежания связанных с этим явлением технологических потерь применяют плазменное травление. Повышение стоимости кристалла и технологические потери из-за травления алюминия делают процесс создания столбиков на пластине менее

привлекательным, чем проволочное соединение.

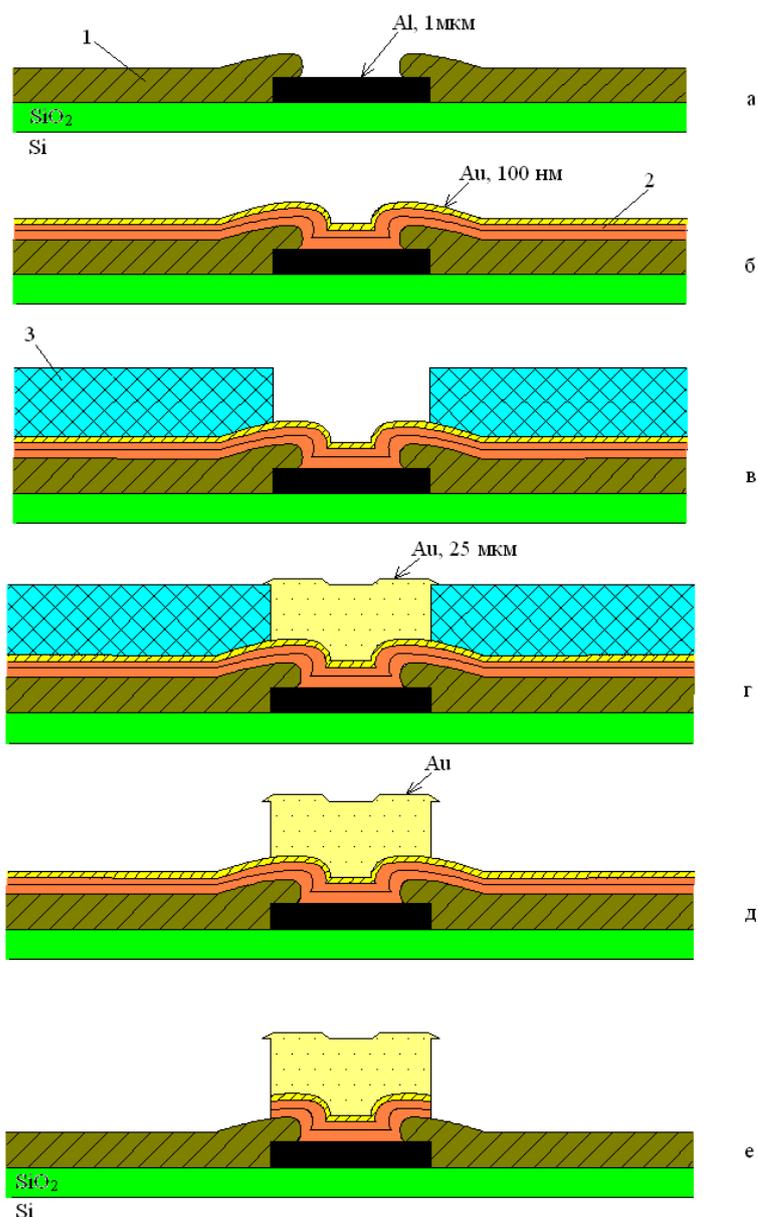


Рис. 9.21. Формирование золотых столбиков на алюминиевых контактных площадках: а – пластина с предварительно сформированной ИС после операций очистки и ионного травления; б — создание контактного барьерного слоя (служащего также проводящим слоем при электролитическом осаждении золота) со слоем золота для предотвращения окисления; в — нанесение толсто пленочного фоторезиста; г—электролитическое осаждение слоя золота для образования столбиков; д– снятие резиста; е - удаление проводящих тонких пленок химическим травлением: 1 - окисел кремния 1-1,5 мкм; 2 - контактный барьерный слой 100 нм; 3 - фоторезист 25 мкм.

Автоматизированное соединение на ленточном носителе используется для монтажа кристаллов небольшого размера в плоском корпусе с двухрядным расположением вертикальных выводов, где стоимость процесса создания столбика

на прибор низка и невелики потери из-за травления металлизации (вследствие малых размеров кристалла), а также для подсоединения кристаллов СБИС. Технологический процесс сборки методом перевернутого кристалла, по которой выполнено соединение кристалла шариками припоя начинается с последовательного напыления Cr, Si и Au через металлическую маску на все алюминиевые контактные площадки на пластине, разделение пластины на кристаллы, формирование шариков припоя, монтаж кристаллов и герметизацию.

Контактные площадки могут быть расположены в любой области на поверхности кристалла, с некоторыми ограничениями. Золото предохраняет тонкопленочную структуру от окисления до нанесения на покрытие Cr–Cu–Au последующих слоев Pb–Sn. Пленку Pb–Sn осаждают на большей площади по сравнению с площадью, занимаемой контактными площадками с покрытием Cr–Cu–Au. Площадь и толщина этой осажденной пленки определяют окончательные размеры шарика.

Структура, полученная осаждением Pb и Sn, показана на рис. 9.22 штриховой линией. После напыления готовую структуру помещают в камеру с пониженным давлением, где с пленки Pb–Sn благодаря силам поверхностного натяжения удаляется оксидный слой и образуется шарик припоя с площадью основания, определенной размерами покрытия Cr–Cu–Au.

Оптимизации конструкции заключается в сведении к минимуму деформации сдвига в объеме припоя во время термоциклирования и достижение максимально возможной прочности соединения на поверхности раздела между кристаллом и подложкой. Прочность соединения поверхностей раздела кристалл — припой и подложка — припой на разрыв оптимизируется выбором таких размеров контактной площади подложки, чтобы при испытаниях на термоциклирование и скручивание эти две поверхности раздела разрушались в равной степени.

Это условие достигается выравниванием поверхностных напряжений. Величину радиуса шарика припоя r_1 устанавливают на основании многих факторов, включая сведение к минимуму области кремния, на которой локализовано соединение. Обозначим через K соотношение радиусов контактной площадки и шарика припоя r_0/r_1 . Тогда оптимальный размер квадратной контактной площадки области определится из соотношения [11]:

$$2r_0^* = \sqrt{K \cdot r_1}, \quad (9.8)$$

где $2r_0^*$ — краевая длина контактной области.

Если столбик припоя имеет форму усеченного конуса с разной площадью верхнего и нижнего оснований, то его объем можно определить как:

$$V = \frac{\pi h}{6} [h^2 + 3(r + r)], \quad (9.10)$$

где h — высота столбика припоя.

Возникновение некоторых осложнений для кристаллов СБИС связано с тем, что не все столбики припоя расположены на равном расстоянии от нейтральной

точки. Если это расстояние увеличивается, а размеры соединений остаются неизменными, время до разрушения в цикле усталостных испытаний уменьшается. Если необходимо поддержать это время на прежнем уровне, то для сохранения оптимальных условий может быть увеличен радиус r_1 вместе с другими размерами. Чем больше радиус r_1 , тем больше область для осаждения припоя и, следовательно, больше расстояние между контактными площадками. Увеличение этого расстояния требует большей площади кремния. Выбор размера и формы шарика припоя проводят с учетом стоимости кремния, надежности, быстродействия схемы, а также многих других параметров.

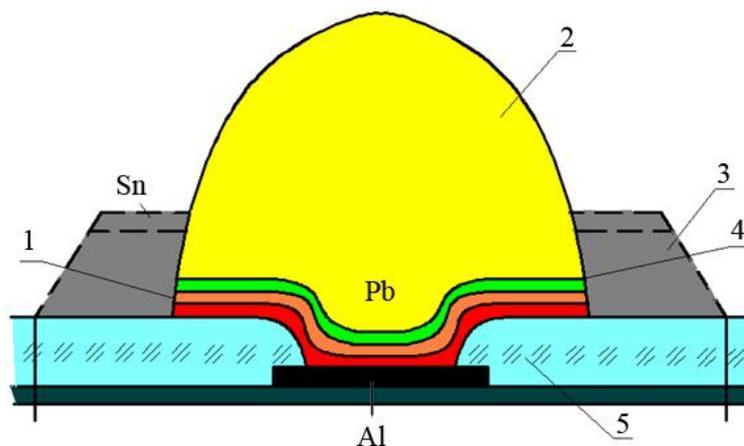


Рис. 9.22. Поперечное сечение контакта при монтаже ИМС методом перевернутого кристалла: 1 – слой фазового состава Cr+Cu, 2 – шарик припоя 5% Sn - 95% Pb, 3 – осажденный припой, 4 – интерметаллическое соединение Cu-Sn, 5 – стекло

Основными преимуществами технологии сборки методом перевернутого кристалла являются возможность матричного расположения контактных площадок (по сравнению с контактными площадками, расположенными по краю кристалла) и очень малая протяженность межкомпонентных соединений, что сводит к минимуму величину их индуктивности. Основные недостатки этой технологии — худшие тепловые характеристики (по сравнению с кристаллом, присоединенным обычным способом) и трудность герметизации матрицы контактных площадок.

Преимуществам "паучкового" метода сборки являются: легкость контроля качества; неограниченное количество контактных площадок в ИС; применение алюминиевых выводов позволяет получать надежное сварное соединение методом УЗ сварки; технологический процесс получения выводов не связан с обработкой пластины, что не сказывается на цикле изготовления ИС; увеличение производительности в 30-50 раз по сравнению со сборкой проволочными выводами. Недостатком "паучковых" выводов является трудность замены кристалла.

Микросхемы в пластиковых корпусах с шариковыми выводами (PBGA) хорошо зарекомендовали себя в изделиях широкого применения. Однако в крупно-

габаритных керамических корпусах (СВGA) шариковые выводы испытывают сильные нагрузки из-за большой разницы в коэффициентах теплового расширения керамического корпуса ИС и материала печатной платы. Массив шариковых выводов испытывает деформации растяжения и сжатия, особенно на краях керамического основания и непосредственно под гранями кристалла, установленного по обычной технологии или технологии Flip-Chip.

При продолжительном влиянии переходов от горячего к холодному состоянию и обратно шариковые выводы будут отслаиваться от корпуса микросхемы / или от контактных площадок на печатной плате, что в конечном итоге приведет к выходу из строя микросхемы. Ослабление деформационных напряжений в ИС обеспечивается заменой шариковых выводов на столбиковые (рис. 9.23) [12].

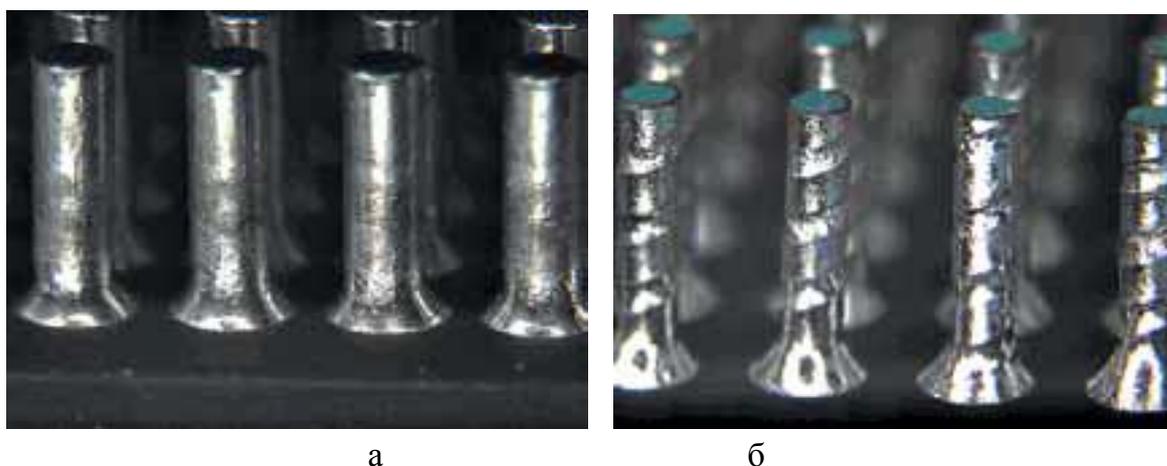


Рис. 9.23. Столбиковые выводы: простые (а) и армированные (б)

Применение корпусов ССGA (Ceramic Column Grid Array – керамические корпуса со столбиковыми матричными выводами) (рис.9.24) позволяет существенно понизить разницу в коэффициентах теплового расширения между крупногабаритными керамическими корпусами интегральных микросхем и стеклоэпоксидными печатными платами – до 10 ppm/°C..

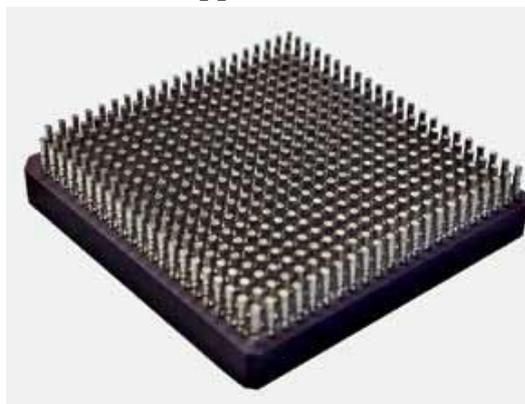


Рис. 9.24. Микросхема с матричным расположением столбиковых выводов

Столбиковые выводы ССGA поглощают деформационные напряжения, возникающие при применении изделий в аэрокосмическом и военном сегментах

электроники – там, где они работают в условиях большой разницы температур, высокой вибрации и возможных перегрузок. В интегральных микросхемах ССГА используются цилиндрические столбики, обладающие высокой температурой плавления. Столбиковые выводы не изменяют своей формы в процессе пайки при установке на корпус ИС, а также при повторном оплавлении во время сборки электронного модуля. Для соединения столбика оплачивается только небольшая область, образуя галтель из более низкотемпературного припоя.

В 2012 году NASA разработала микропружинные спиральные контакты – Micro-coil Spring – как альтернативу столбиковым выводам. Для того чтобы закрепить микропружинные спиральные контакты на корпусе ИС и контактных площадках печатной платы, используются бессвинцовая паяльная паста SAC305 (Sn96.5/Ag3.0/Cu0.5) (рис. 9.25).



Рис.9.25. Микропружинные спиральные контакты

В жестких температурных условиях работы изделий электроники, при циклическом изменении температуры от низких отрицательных до высоких плюсовых значений, применение микропружинных спиральных и столбиковых выводов в СВГА-корпусах позволяет получать более надежные механические и электрические соединения, чем при использовании шариковых выводов, провоцирующих трещины в электрических соединениях, способные привести к полному выходу из строя всего изделия.

Список литературы к главе 9

1. Токопроводящие клеи для монтажа электроники космического назначения / С.Н. Гладких [и др.] // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2016. – № 3 (00064). – С. 156–160.
2. Синкевич В.Ф. Физические основы диагностирования предельных состояний и обеспечения надежности мощных транзисторов // Электронная промышленность. – 1990. – Вып.6. – С. 19–26.
3. Ланин В.Л., Керенцев А.Ф. Сборка мощных бескорпусных MOSFET- транзисторов для поверхностного монтажа // Силовая электроника. – 2009. – № 3. – С. 76–79.
4. Ануфриев Л.П., Керенцев А.Ф., Ланин В.Л. Автоматизированный монтаж кристаллов транзисторов вибрационной пайкой // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – № 3. – С. 47–50.

5. Ланин В.Л., Рубцевич И.И., Керенцев А.Ф. Программно-управляемый монтаж кристаллов силовых транзисторов вибрационной пайкой в защитной атмосфере // Технологии в электронной промышленности.– 2010.– № 5. – С. 50–56.
6. Керенцев А.Ф., Ланин В.Л. Особенности сборки транзисторов в корпусе D-PAK // Компоненты и технологии. – 2006. – № 9. – С. 138–140.
7. Khanna V.K. IGBT. Theory and Design. – N.Y., IEEE Press, 2005.
8. Ланин В.Л., Ануфриев Л.П. Монтаж кристаллов IGBT транзисторов // Технологии в электронной промышленности. – 2009. № 2. – С. 94–99.
9. Lopez E. P., Vianco P.T., Rejent J.A. Solderability testing of Sn-Ag-xCu Pb-Free Solders on Copper and Au-Ni-Plated Kovar Substrates // J. of Electronics Materials. – 2005. –V.34. –№ 3.–P. 299–310.
10. Ланин В.Л., Керенцев А.Ф., Турцевич А.С. Бессвинцовая припойная композиция для сборки полупроводниковых приборов // Доклады БГУИР. – 2007.– № 2(18). – С. 122–127.
11. Технология СБИС. Кн.2.Пер. с англ. / Под ред. С. Зи.– М.:Мир, 1986.– 453 с.
12. Харт, М. Применение CGA как средство увеличения надежности / М. Харт, А. Гаранин // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2016. – № 7(00068). – С. 180–181.

ГЛАВА 10

МОНТАЖНАЯ МИКРОСВАРКА

10.1. Классификация методов и механизмы образования соединений

Одним из наиболее распространенных способов электрического соединения между контактными площадками кристалла и выводами корпуса, применяемых в настоящее время, является соединение с помощью проволочных выводов.

Проволочный монтаж остается одним из основных методов сборки ИС, что объясняется высокой автоматизацией процесса, универсальностью по отношению к различным технологическим вариантам производства и геометрическими размерами ИС. Прогресс в развитии методов формирования межсоединений в изделиях интегральной электроники позволил существенно снизить трудоемкость этих операций и добиться заметных успехов на пути к их полной автоматизации. Однако трудоемкость операций формирования межсоединений остается определяющей в процессе производства изделий микроэлектроники и для разных типов приборов составляет от 30 до 60 % всей трудоемкости сборки. При этом на долю разрушения межсоединений приходится значительный процент отказов микросхем в процессе эксплуатации.

В настоящее время применяются следующие технологические процессы формирования межсоединений: соединение проволокой; на ленточных носителях и сборка методом перевернутого кристалла. Среди основных методов подсоединения проволочных выводов, таких как: термокомпрессионная сварка (ТКС), термозвуковая сварка (ТЗС), ультразвуковая сварка (УЗС), сварка расщепленным электродом, сварка косвенным импульсным нагревом наиболее широкое распространение получили методы ТКС и ТЗС для золотой проволоки и УЗС для алюминиевой проволоки диаметром 20–60 мкм [1].

Процесс УЗ микросварки сопровождается введением механических колебаний УЗ частоты в зону контакта, что приводит к пластической деформации проволочного вывода, разрушению и удалению оксидных пленок с созданием атомно-чистых ювенильных поверхностей, интенсифицирует процесс образования активных центров при формировании микросварного соединения без большой деформации проволоки и значительного нагрева. При ТЗ микросварке соединения формируются в результате совместного действия УЗ энергии, усилия нагружения инструмента и температуры нагрева до 200–220°C, что повышает воспроизводимость качества соединений, устраняет критичность к колебаниям свойств соединяемых материалов.

Сравнительный анализ качества микросварных соединений показал, что наибольший вклад в развитие дефектов контактного узла в виде локальных полей упругих напряжений вносит метод ТЗС золотой проволоки с ограниченным нагревом кристалла (200°C), при этом ширина поля напряжений по глубине 25 мкм составляет до 200 мкм. При ТЗС инструмент в холодном состоянии в момент касания с подложкой отводит тепло и снижает температуру в зоне сварки на 40–50°C. В условиях серийного производства это обстоятельство вынуждает технологов увеличивать при ТЗС или давление на инструмент, или температуру нагрева кристалла, или мощность УЗ генератора. Однако повышение температуры стола ограничивается, например, свойствами клея. Увеличение же амплитуды колебаний инструмента и давления на инструмент приводит к росту остаточных механических напряжений в областях кристалла, прилегающих к контактными площадкам.

На надежность микросварных соединений влияют: физико-механические свойства материала контактных площадок, геометрическая форма инструмента, активация зоны контакта при сварке. Акустические условия в зоне УЗ сварки зависят от морфологии покрытий контактных площадок. Важное значение имеют такие характеристики покрытий контактных площадок, как величина зерна, пористость, концентрация неметаллических примесей, микрогеометрия поверхности. Для образования прочного и надежного микросварного соединения требуется поверхность покрытия контактных площадок с малой высотой микронеровностей и возможно, меньшим значением внутренних напряжений.

Получение надежных микросварных соединений алюминиевых проволочных выводов с контактными площадками кристаллов и корпусов интегральных схем может быть достигнуто путем решения взаимосвязанных проблем: обеспечения заданного микрорельефа и требуемых физико-механических свойств покрытия, а также активации процесса сварки проволочных выводов.

10.2. Термокомпрессионная микросварка

Термокомпрессионная сварка (ТКС) — это метод соединения металлов в твердом состоянии при контролируемой ограниченной диффузии, относительно высоких удельных давлениях и нагреве до температуры ниже температуры образования эвтектики соединяемых материалов. Поскольку в обычных условиях реальные поверхности свариваемых материалов покрыты оксидными пленками, то образование прочного сварного соединения может произойти при условии деформации в зоне контактирования. Деформация может обеспечить механический контакт соединяемых материалов и разрушение адсорбированных поверхностных и оксидных пленок. При соприкосновении чистых поверхностей свариваемых элементов может произойти «схватывание». Области «схватывания» возникают на участках, где возможны взаимодействия между свободными элементами двух разнородных атомов и образование межатомной связи. Необходимая энергия для преодоления энергетического барьера поверхностных атомов и повышения их энергии до определенного уровня, при котором может произойти взаимодействие, вводится в результате пластической деформации и нагрева.

При деформации присоединяемого проводника в местах максимальных касательных напряжений возникают дислокации на контактных поверхностях тонкопленочных покрытий. Повышение плотности дислокации приводит к развитию участков «схватывания» и площади взаимодействия, однако увеличение температуры, давления и длительности процесса может вызвать образование дислокации в полупроводнике. Это явление нежелательно при сборке ИС и полупроводниковых приборов с небольшой глубиной залегания р–п перехода.

В качестве материалов выводов используются только высокопластичные металлы (алюминий, золото, серебро, медь), присоединение которых может осуществляться при температуре до 320°C, что несколько ниже температуры образо-

вания дислокации в полупроводниках (для кремния 450°C) [2].

Наиболее эффективным при термокомпрессии является одновременный нагрев прибора и инструмента, так как он позволяет обеспечить строгое поддержание температуры в зоне сварки. Установлено, что при температурах более 360°C разрушение оксидной пленки при сварке происходит с последующим образованием интерметаллических фаз, богатых золотом. Последние имеют плохую адгезию с поверхностью оксида кремния, вызывают хрупкость соединения и снижают надежность контактов. Диффузионные процессы при образовании интерметаллических соединений способствуют появлению трещин и пор в контакте, образованию тройной эвтектики Si-Al-Au с невысокой температурой плавления. Избежать этого можно, применив однородные материалы, например Al-Al .

При термокомпрессии "внахлестку" капилляр с усилием около 25 г прижимает золотую проволоку к нагретой до 300°C контактной площадке кристалла на подложке. После приварки проволоки к внешнему выводу корпуса происходит ее отрезание с одновременным формированием "сапожка" для следующего присоединения. Метод применяют в ИС, где требуется присоединение проволоки к нескольким контактными площадкам без ее обрыва (рис. 10.1).

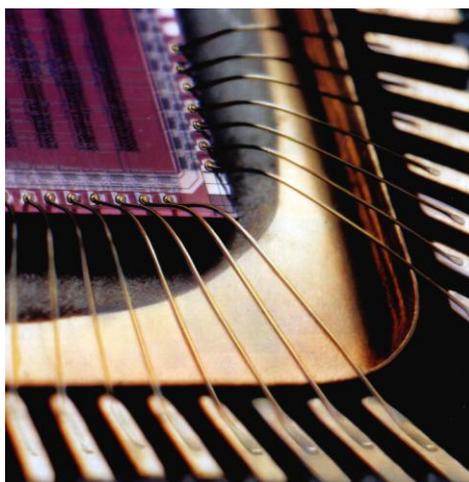


Рис. 10.1. Термокомпрессионная микросварка золотой проволокой

Общим недостатком метода является то, что он не рекомендуется для приварки плоских проводников, так как при их деформации мало течение металла в направлении плоскости контакта, что затрудняет образование соединений. Разновидности термокомпрессии приведены на рис. 10.2.

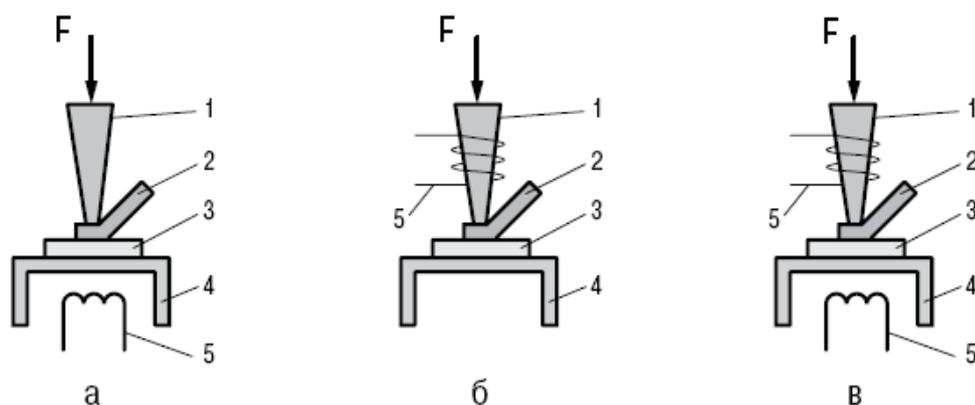


Рис. 10.2 Разновидности термокомпрессии в зависимости от способа нагрева: а – столика, б – рабочего инструмента, в – столика и инструмента, 1– рабочий инструмент, 2– вывод; 3 – монтажная подложка; 4 – столик; 5 – нагреватель

Сварка давлением с импульсным косвенным нагревом находит применение для сборки микросхем. Столик установки, где крепится микросхема, подогревается от 50 до 300⁰С. Сварочный электрод разогревается до 600⁰С. Используется два электрода: один служит для присоединения проводника к контактной площадке микросхемы, второй - к внешним выводам корпуса. Длительность теплового импульса 0,3–3,0 с. Преимущество способа состоит в том, что он исключает нагрев изделия до температуры плавления эвтектики золото–кремний, применяемой для пайки кристалла ИС к корпусу [3].

При сварке расщепленным электродом проводник прижимается к контактной площадке двумя электродами, расположенными с небольшим (0,1–3,0 мм) зазором друг от друга. При приложении напряжения к электродам происходит локальный нагрев проводника в месте контакта. Этот способ чаще всего применяется для присоединения плоских ленточных выводов к пленкам на подложках.

10.3. Ультразвуковая микросварка проволочных выводов

Ультразвуковая сварка (УЗС) — это метод соединения металлов в твердом состоянии, отличающийся от других видов сварки способом введения энергии в зону сварки. Сближение свариваемых изделий и образование соединения происходит при пластической деформации материалов от совместного воздействия усилия напряжения и тепловой энергии за счет процессов трения и воздействия на материалы УЗ полем частотой, как правило, 66±10 % кГц для микросварки (рис. 10.3). Этот метод наиболее перспективен при выполнении технологических операций сборки различных типов полупроводниковых приборов алюминиевой проволокой. Достоинства УЗС: возможность соединения широкой номенклатуры материалов; получение соединений материалов с окисленными поверхностями.

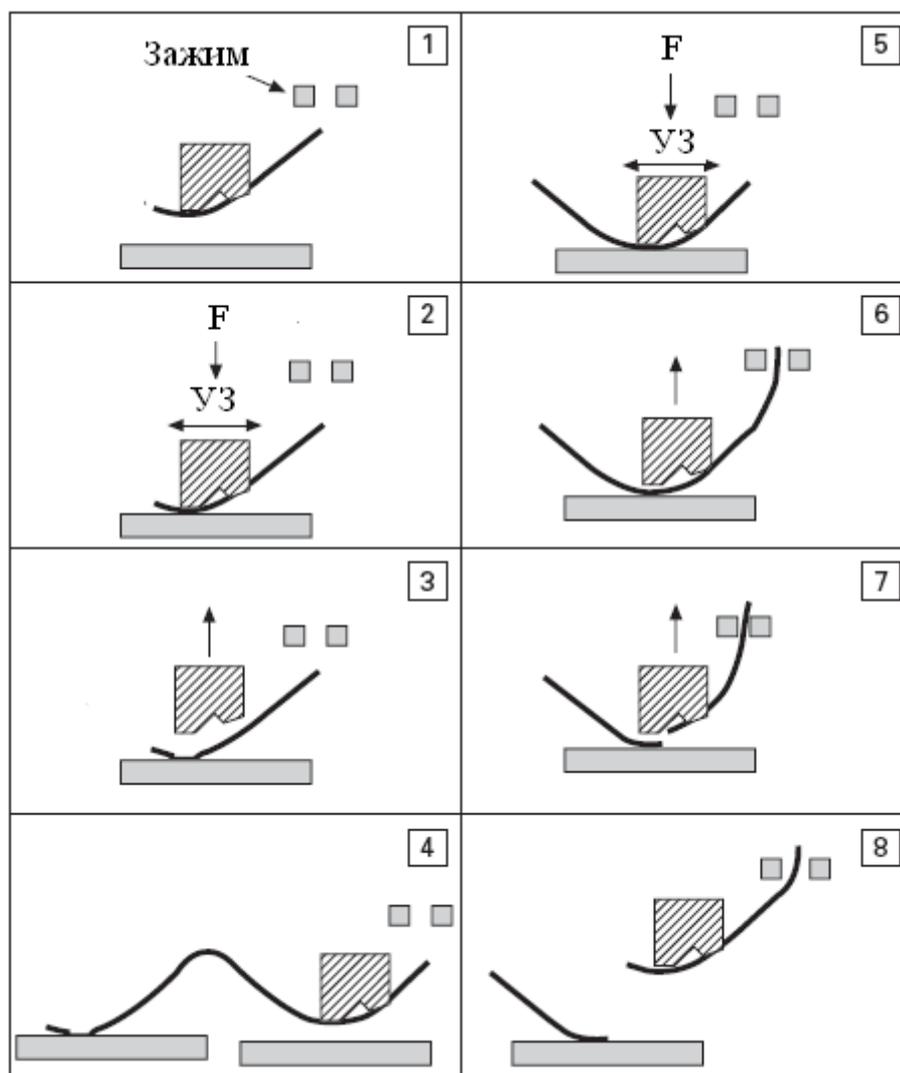


Рис. 10.3. Последовательность формирования проволочной перемычки при сварке внахлест

При УЗ сварке в то время как проволока находится под нагрузкой, механическое перемещение, или вибрация инструмента вызывает скачок уплотнения на алюминиевой контактной площадке (рис. 10.4). Распространение волнового фронта по проволоке обуславливает образование волнистой структуры посредством воздействия напряжения сдвига в алюминиевой контактной площадке перпендикулярно направлению вибраций. До начала (или во время) движения волнового фронта УЗ энергия поглощается проволокой, при этом последняя размягчается и под действием нагрузки течет, разрывая поверхностный окисел и оставляя незащищенную свежую поверхность проволоки и контактной площадки. Эта свежая незащищенная поверхность металла быстро сваривается. Соединение образуется в тороидальной области вокруг центра контактной площадки и проволоки внутри области волнистой структуры.

Поскольку проволока размягчается и деформируется, вертикальное напряжение уменьшается во времени. В то же время вибрирующее воздействие инструмента для УЗ сварки вызывает появление горизонтального напряжения. При

большой величине вертикального напряжения соединение не происходит, так как сдержано боковое движение. При среднем вертикальном напряжении происходит соединение, и свариваемая область растет со временем, так как вертикальное напряжение уменьшается. Поскольку проволока размягчается и деформируется, вертикальное напряжение уменьшается во времени. В то же время вибрирующее воздействие инструмента для УЗ сварки вызывает появление горизонтального напряжения.

При большой величине вертикального напряжения соединения произойти не может, так как сдержано боковое движение. При среднем вертикальном напряжении происходит соединение, и свариваемая область растет со временем, так как вертикальное напряжение уменьшается.

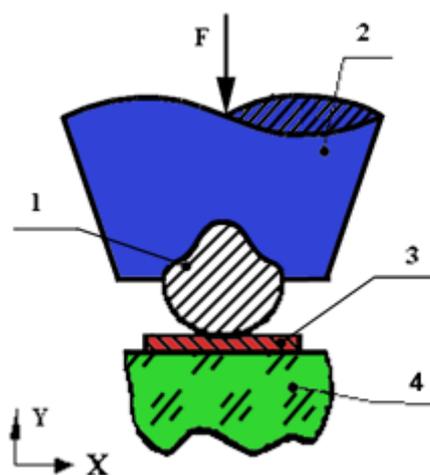


Рис. 10.4. Схема УЗ сварки: 1 – проволока; 2 – сварочный инструмент; 3 – контактная площадка; 4 – кристалл

Взаимодействие золота с алюминием во время соединения золотой проволокой широко исследовано, особенно для процесса термокомпрессионной сварки, где происходит значительный рост образования интерметаллических соединений. При сварке обычно обнаруживается пурпурная интерметаллическая фаза $AuAl_2$, называемая «пурпурной чумой». Ранее считали, что эта фаза является неустойчивой и может привести к хрупкому разрушению свариваемой проволоки. Хотя до сих пор существуют противоречивые мнения о скорости роста возможных интерметаллических соединений и роли ускорителей этого роста (кроме температуры), полагают, что хрупкость соединения вызвана объединением вакансий в полостях, известных как полости Киркендала, вдоль линии сварки. Генерирование вакансий происходит из-за разной скорости диффузии алюминия в золото и наоборот.

Образование сварного соединения определяется, с одной стороны, колебательной скоростью, силой сварочного наконечника и временем сварки. С другой стороны, механизм сварки определяется свойствами свариваемых металлов и поверхностных пленок. Ввод энергии ультразвука в сопряженные на малом

участке металлы вызывает повышение температуры в зоне их контакта, растрескивание твердых и выгорание жировых пленок, пластическое деформирование материала, интенсивную диффузию, рекристаллизацию, плавление и другие явления.

Наиболее существенным условием свариваемости металлов в твердом состоянии является разница в атомных диаметрах свариваемых металлов, которая не должна превышать 15–18 %. При различии диаметров от 19 до 44 % схватывания металлов не происходит. Предельная величина относительной разности диаметров совпадает с условием существования твердых растворов металлов, что дает возможность установить свариваемость из фазовой диаграммы данной пары металлов. Металлы свариваются в случае полной или ограниченной растворимости в твердом состоянии [4].

Сварка возможна и при отсутствии растворимости, если удастся подобрать третий растворяющийся металл, который наносится на один из свариваемых металлов. В общем случае ровные и чистые контактные поверхности свариваются лучше. И, наоборот, грубая механическая обработка свариваемых поверхностей, наличие различных поверхностных пленок, плакирование, как правило, ухудшают свариваемость металлов, а в ряде случаев и исключают её. Благоприятными условиями для схватывания является совпадение зерен с близкой кристаллографической ориентацией.

Процесс УЗС в технологическом плане обусловлен параметрами режима сварки: мощностью колебательной системы, контактным давлением, амплитудой колебаний сварочного наконечника и временем сварки. Он сопровождается увеличением температуры в зоне сварки до 190 °С при усилии сжатия до 2,0–2,5 Н. Это подтверждает предположение о том, что источником тепла при УЗС является трение между свариваемыми металлами при их относительном перемещении.

Электрическая мощность, передаваемая от генератора к преобразователю, определяет амплитуду механических колебаний инструмента и величину сдвиговых напряжений в зоне сварки, под действием которых преодолевается сила трения, вызванная сжатием соединяемых элементов. Мощность, выделяемая в зоне контакта при УЗС равна [5]:

$$P = 0,5(\omega A)^2 R_H, \quad (10.1)$$

где ω – круговая частота; A – амплитуда смещения торца сварочного инструмента; R_H – приведенное активное механическое сопротивление нагрузки, равное:

$$R_H = 0,64M_{тр}F/A, \quad (10.2)$$

где $M_{тр}$ – коэффициент трения; F – усилие сжатия соединяемых элементов. После преобразования выражения (10.1) с учетом (10.2) получим:

$$P = 0,318\omega^2 A M_{тр}F. \quad (10.3)$$

При малых значениях амплитуды колебаний сварное соединение не образуется, поскольку сдвиговых напряжений не хватает для разрушения оксидных пленок в зоне контакта, а при больших - в свариваемых элементах возникают усталостные процессы, приводящие к разрушению соединения. Оптимальные значения амплитуды колебаний составляют 1,5–2,0 мкм.

При малых перемещениях инструмента и времени сварки передача УЗ колебаний в зону монтажа недостаточно эффективна, при больших значениях амплитуды колебаний снижается сила сцепления двух металлов вследствие эффекта скольжения. При большом времени сварки происходит разрыв проводочного проводника по “шейке” из-за его чрезмерной деформации. При исследовании зон схватывания под микроскопом установлено, что глубина объемного взаимодействия свариваемых металлов возрастает с увеличением времени микросварки до 0,8 с. Однако при более длительном времени сварки наблюдается снижение прочности соединения вследствие появления трещин.

Важной задачей в совершенствовании технологии УЗС является изыскание параметров, позволяющих контролировать качество соединений в процессе сварки. Решение этого вопроса дало бы возможность одновременно с автоматизацией значительно повысить воспроизводимость результатов сварки, а также оценить прочность соединений без их разрушения.

Основное влияние на механическую прочность сварных соединений оказывают мощность колебательной системы, амплитуда смещений инструмента, усилие сжатия и время сварки. Функцию контроля качества соединения можно возложить на амплитуду колебаний рабочего инструмента в процессе сварки, но использование её в этом качестве затруднено сложностью фиксации амплитуды при сварке, а также зависимостью её от других параметров процесса. Влияние амплитуды на сварку необходимо рассматривать только с учетом мощности системы. Известно также, что между мощностью и амплитудой колебаний инструмента имеет место линейная зависимость. Амплитуда колебаний сварочного инструмента должна быть такой, при которой могли бы возникнуть относительные перемещения в контакте между деталями. Помимо мощности, она зависит в процессе сварки от усилия сжатия свариваемых изделий и времени сварки, которые в свою очередь зависят от неё.

Особенностью амплитуды колебаний инструмента является её зависимость от внешней нагрузки, которая изменяется как в течение цикла сварки, так и при переходе от сварки к сварке. Изменение внешней нагрузки выражается в изменении амплитуды колебаний инструмента в процессе сварки. Из этого следует, что изменение амплитуды колебаний в процессе сварки связано с прочностью сварного соединения.

Одним из основных параметров, влияющих на поглощение акустической мощности в зоне соединения при УЗ микросварке, является входной механический импеданс соединения. Его изменение в процессе микросварки приводит к

рассогласованию с выходным импедансом УЗ системы, что значительно снижает качество контактов интегральных микросхем, поэтому важно определить зависимости входного механического импеданса соединений от режимов УЗС: длительности процесса и мощности подводимых колебаний, а также от режимов термообработки - температуры и времени отжига полученных контактов. Прямо измерить механический импеданс микросварных соединений трудно, поэтому представляют практический интерес методы косвенного его определения по электрическим параметрам соединений: контактному сопротивлению и индуктивности области стягивания линий тока в контакте.

Время УЗ микросварки определяется скоростью процессов разрушения окисных пленок на соединяемых элементах и объемного взаимодействия материалов в твердой фазе. Оптимальное время схватывания материалов составляет 0,2–0,3 с, увеличение времени сварки лишь в течение 1,5 с приводит к изменению глубины зоны объемного взаимодействия за счет диффузионных процессов, однако столь длительное время воздействия УЗ колебаний может вызвать усталостное разрушение соединений. Предварительный подогрев свариваемых элементов до 190⁰С уменьшает продолжительность воздействия ультразвука до 0,25 с и способствует образованию более прочных соединений.

Статическая нагрузка на сварочный капилляр непосредственно влияет на усилие сжатия соединяемых элементов и определяет деформацию проволочного вывода, а в конечном итоге и стабильность сварного соединения. Для алюминиевой проволоки диаметром 35 мкм нагрузку на капилляр выбирают ориентировочно в диапазоне 20–40 сН. Важным технологическим фактором также является форма рабочей части инструмента. В связи с многообразием типоразмеров инструмента, предназначенного для выполнения различных технологических операций (пайки кристаллов, проволочного монтажа, групповой сварки), поиск места сопряжения инструмента с волноводом, чтобы не вызывать расстройку системы по частоте и ненужный вид колебаний, представляет определенную сложность.

Выбор частоты УЗ колебаний для микросварки основан на необходимости ограничения амплитуды колебаний, что уменьшает знакопеременные напряжения в соединяемых деталях и опасность разрушения соединений. Повышение частоты УЗ-колебаний для сварки тонких проводников следует рассматривать как прием, разрешающий понизить величину амплитуды колебаний без изменения акустической мощности. Понижение амплитуды колебаний в свою очередь уменьшает знакопеременные напряжения в свариваемых материалах и опасность усталостного разрушения, вероятность которого особенно велика при сварке тонких проводников.

Следует предположить, что увеличение частоты колебаний позволит увеличить темп роста и значение температуры в зоне сварки и обеспечить процесс формирования соединений за меньшее время и при меньшей температуре нагрева изделия. Выбор частоты резонанса определялся из конструктивных размеров

сварочных головок выпущенного оборудования для возможности его модернизации. Использование повышенной УЗ частоты (94 кГц) по сравнению со стандартной частотой (66 кГц) позволяет вести присоединение проводников при температуре нагрева изделия 100-180°C. При необходимости возможно использование дополнительного нагрева микроинструмента, если не допускается нагрев изделия ниже 100°C [6].

Качество соединений определяется в основном физико-химическими свойствами соединяемых поверхностей. Изменение микрорельефа поверхностей и структуры материалов, наличие окисных и адсорбированных пленок приводит к дестабилизации процессов микросварки, ухудшению качества и надежности сварных соединений, снижению производительности процесса.

10.4. Ультразвуковая микросварка ленточных выводов

При сборке мощных полупроводниковых приборов в корпусах ТО–220, ТО–218 применяют алюминиевую проволоку больших диаметров (от 100 до 500 мкм), а также ленточные перемычки, обеспечивающие протекание большой плотности тока (рис. 10.5). Эта технология получила название HARB (Heavy Aluminium Ribbon Bonding). Присоединение одной ленты шириной 2 мм и толщиной 0,3 мм эквивалентно трем проволочным перемычкам диаметром 0,5 мм.

Для УЗ микросварки таких выводов фирмой Ortodyne Electronics (США) разработана специальная установка М-20 с производительностью до 600 приборов/час (рис.10.6), которая оснащена инструментом с двойной канавкой для сварки проволоки диаметром от 100 до 500 мкм, а также специальным инструментом для сварки ленточных перемычке шириной от 25 до 1000 мкм. Инструмент снабжен направляющей прорезью для петлевания и позиционирования ленты. В большинстве сварочных установок используются УЗ колебания примерно постоянной амплитуды, что приводит к избыточному плавлению чистых поверхностей и недостаточному плавлению грубых или более загрязненных участков. Для устранения возможных дефектов сварки в модели М–20 преобразователь и генератор охвачены устройством обратной связи, которое осуществляет непрерывный мониторинг процесса сварки и подстраивает амплитуду колебаний под особенности сварной поверхности. По мере достижения оптимальной деформации провода или перемычки амплитуда колебаний снижается, что обеспечивает воспроизводимость качества соединений при неоднородных условиях в зоне сварного контакта. В установке имеется цепь фазовой синхронизации, которая постоянно отслеживает частоту генератора и автоматически ее корректирует.



Рис. 10.5. Соединения ленточными перемычками в силовых приборах



Рис. 10.6. Установка УЗ микросварки модели М–20

Для монтажа алюминиевых ленточных межсоединений (210x40 мкм) разработана многоопциональная установка ЭМ–4320 (УП «КБТЭМ–СО») с опцией разварки «клин–клин» (рис. 10.7). Особенностью данной установки является наличие рабочего столика с подогревом рабочей зоны до 350° С, что позволяет сваривать проводники из Al и Au. Быстросменная сварочная головка позволяет осуществлять оперативный переход на сварку методом «шарик–клин». Кроме того, есть исполнение установки ЭМ–4320 для присоединения Au и Cu выводов методом микроконтактной сварки расщеплённым электродом типа ЭК–1, ЭК–2. В установке ЭМ–4320 (сварка «клин–клин»/«шарик–клин») используется ультразвуковая система повышенной частоты – 110 кГц. Использование подобных систем в установках микросварки в настоящее время является мировым стандартом. Основное достоинство УЗ систем с частотой 100 кГц – возможность присоединения проводников, преимущественно золотых, при более низких температурах, чем при применении «традиционных» УЗ-систем на 60 кГц. Автономный УЗ генератор (УЗГ) выполнен с микроконтроллерным управлением, обеспечивающим автоматическую настройку на резонансную частоту и контроль основных параметров (импеданс, частота). Максимальная выходная мощность УЗГ на

стандартной нагрузке (35 Ом) – 4 Вт, что позволяет присоединять проводники диаметром/толщиной до 75 мкм. При УЗ микросварке использовался доработанный микроинструмент КУТ5 (рис. 10.8) с прямоугольным отверстием для подачи алюминиевой ленты под торец микроинструмента.



Рис. 10.7. Многоопциональная сварочная установка ЭМ–4320

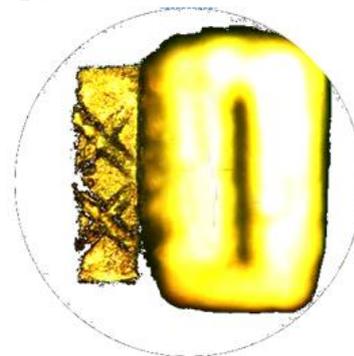


Рис. 10.8. Внешний вид рабочего торца сварочного микроинструмента

При разварке алюминиевых ленточных межсоединений толщиной 40–60 мкм рекомендуются следующие режимы: нагрузка – 80–100 г, время сварки – 60–80 мс, выходная мощность УЗГ – 1,0–1,2 Вт. Качество сварных соединений ленточных перемычек (рис. 10.9) оценено методом неразрушающей лазерной фотоакустической диагностики. Для большей наглядности проведено совмещение изображений: на оптическое изображение микросварного соединения (рис. 10.10, а) поверх с соблюдением масштаба накладывалась соответствующая ему лазерная фотоакустическая топограмма (рис. 10.10, б). Чёрному цвету, указывающему на области отсутствия сплошности, задавалась прозрачность. Эта операция позволяет количественно оценить площадь омического контакта, образовавшегося в каждом конкретном случае микросварки.

В качестве критерия при контроле качества в данном случае целесообразно взять приблизительное значение площади областей сплошности сварного соединения по размеру светлых областей перекрывающих отпечаток рабочего торца микроинструмента относительно общей площади соединения (100 x 200 мкм).

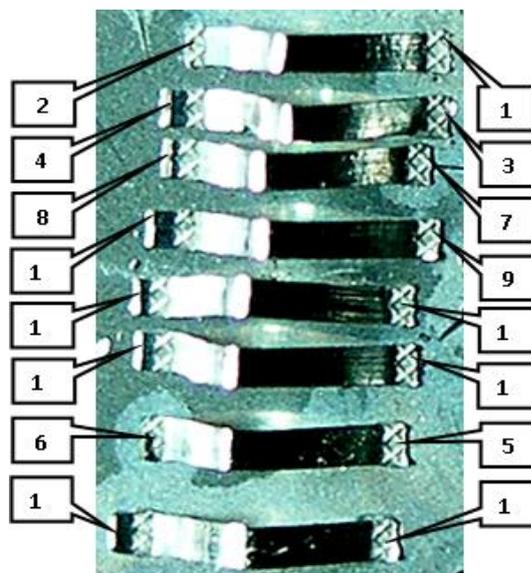


Рис. 10.9. Внешний вид ленточных перемычек

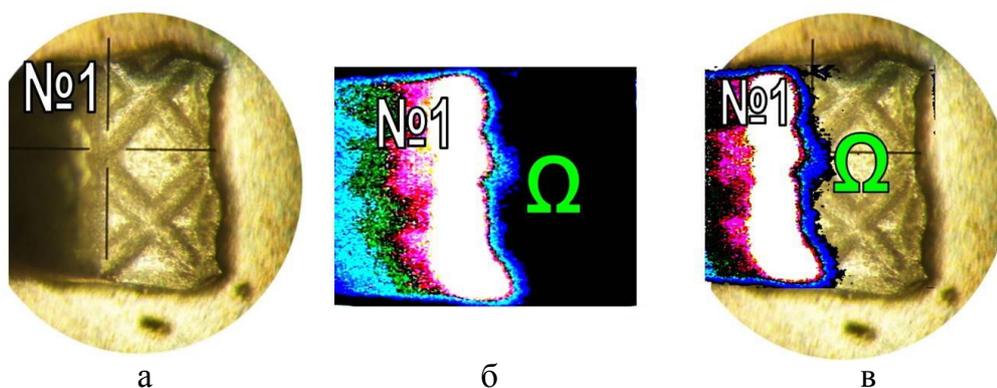


Рис. 10.10. Внешний вид (а) качественного микросварного соединения №1 и соответствующая ему лазерная фотоакустическая топограмма (б); (в) – совмещение изображений а и б с заданием прозрачности чёрному цвету

В табл. 10.3 приведены максимальные значения несплошности сварных соединения для каждой перемычки, выраженные в процентном отношении к площади отпечатка рабочего торца сварочного микроинструмента, а также прочность перемычек на отрыв и процент потери прочности по отношению к прочности ленты на разрыв (0,45 Н) [7]. Отрыв ленты происходил именно на тех сварных соединениях, где на лазерных фотоакустических топограммах регистрировалась максимальная несплошность в слое взаимодействия свариваемых материалов (светлые области). Эталонном качественном соединении служили сварные точки для перемычек №1 и №2, полученные при усилии нагружения 80 г, длительности сварочного импульса 60 мкс и мощность сварочного импульса 1,2 Вт.

Таблица 10.3. Характеристики качества ленточных перемычек

№ перемычки	1	2	3	4	5	6
Максимальная несплошность соединения, %	5	12	15	20	40	60
Прочность на отрыв, Н	0,43	0,37	0,36	0,33	0,31	0,21
Снижение прочности по отношению к прочности ленты на разрыв, %	4	17	20	26,7	31	53

10.5. Термозвуковая микросварка

Термозвуковая сварка (ТЗС) находит все возрастающее применение при сборке изделий микроэлектроники, поскольку соединения формируются в результате совместного действия температуры, энергии УЗ колебаний сварочного инструмента и усилия нагружения инструмента. Данный способ сварки как бы объединяет отдельные качества ТЗС и УЗС и дает хорошие соединения при существенном смягчении режимов сварки, прежде всего температуры. ТЗС используется в первую очередь при автоматизированной сборке приборов, критичных к температурам свыше 200–250°C. К таким относятся быстродействующие приборы на арсениде галлия, заказные БИС и СБИС. Применим этот способ сварки и для сборки толстопленочных ГИС. Качественные, устойчивые к повышенным температурам (150°C, 3000 ч) и термоциклированию (100 циклов; — 55...+150°C) соединения золотой проволоки с медными печатными проводниками получаются при температуре подложки 105–200°C. ТЗС широко применяют для сборки ИС и БИС массовых серий с целью смягчения режимов и снижения критичности сварочного процесса к колебаниям качества соединяемых материалов.

Термозвуковая сварка "шариком" используется для сварки золотой проволоки с алюминиевыми и золотыми контактными площадками (рис. 10.11). Нагрев подложки до 150°C, усилие прижима 20–50 г, УЗ колебания 60 кГц мощностью 1–2 Вт, время 20–200 мс [8]. Соединения, полученные "шариком", более прочные, чем полученные методом "клина". Термозвуковая сварка характеризуется сложной схемой напряженно-деформированного состояния свариваемых материалов с одновременным протеканием в зоне сварки таких процессов как трение, пластическая деформация, отдых, возврат, рекристаллизация и др. Все эти процессы взаимосвязаны между собой и определяют окончательные свойства сварных соединений.

Процесс ТЗС включает следующие этапы: формирование шарика, контактирование и предварительная деформация, УЗ и термическое воздействие. Процесс ТЗС способом «шарик-клин» начинается с формирования шарика, который образуется в результате расплавления проволоки искровым разрядом между электродом разрядника и концом проволоки (рис. 10.12).

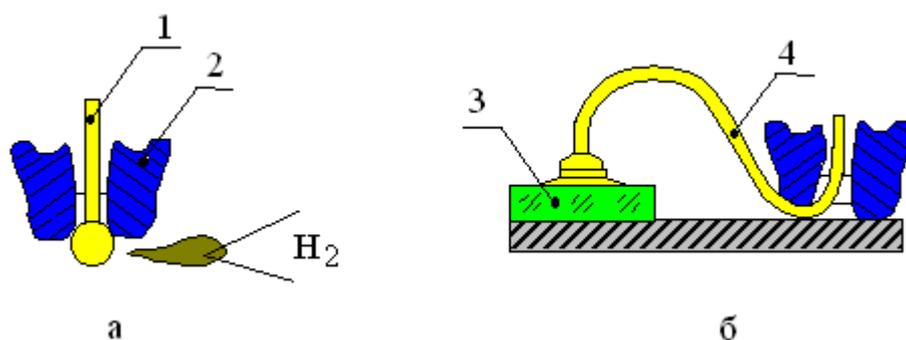


Рис. 10.11. Термозвуковая сварка золотой проволоки методом шарика – клина: а – образование шарика с помощью водородной микрогорелки; б – соединение с кристаллом: 1– проволока, 2– капилляр, 3– кристалл, 4– петля

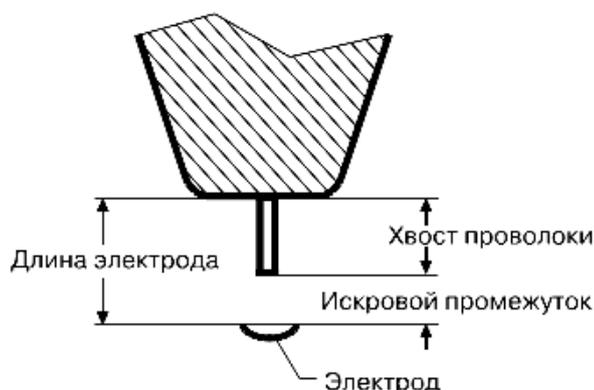


Рис. 10.12. Исходное положение разрядника и проволоки перед образованием шарика

При подаче высоковольтного маломощного импульса напряжением порядка 4 кВ на электрод разрядника между проволокой и электродом возникает искровой разряд. Температура возникающей плазмы вокруг проволоки достигает температуры плавления золотой проволоки ($\sim 1063^\circ\text{C}$) при токе разряда до 40 мА. При расплавлении конца проволоки силы поверхностного натяжения образуют шарик. Технически проще подавать на электрод положительный потенциал по отношению к проволоке (при этом она заземлена), поскольку катод при разряде всегда более «горячий». При таком способе ток разряда достигает в импульсе 10–15 мА, причем желательно, чтобы форма тока была спадающей, в противном случае возникает асимметрия образованных шариков относительно оси проволоки (эффект “golf-club”). В основном в блоке формирования шарика (БФС) при таком способе используется разряд предварительно заряженного конденсатора через ограничительную цепь (высокоомный резистор). Несмотря на относительную простоту «положительного» БФС, к настоящему времени они практически вытеснены БФС, формирующие на выходе импульс отрицательной полярности.

При наблюдении формирования шарика с использованием положительной полярности в микроскоп можно увидеть, что сам шарик и проволока окружены плазмой толщиной около 50 мкм (рис. 10.13). От шарика плазма отстоит на уда-

лении от конца капилляра 0,1–0,15 мм. Учитывая, что для образования шарика на проволоке диаметром 30 мкм нужна длина “хвоста” 0,2 мм, то при формировании шарика плазма может достигнуть торца капилляра, что сокращает срок службы капилляра от воздействия высокой температуры. Другой проблемой образования шарика при этой полярности является сильный отжиг перехода шарик-проволока и утонение проволоки, что может привести к обрыву перемычки во время цикла формирования [9].

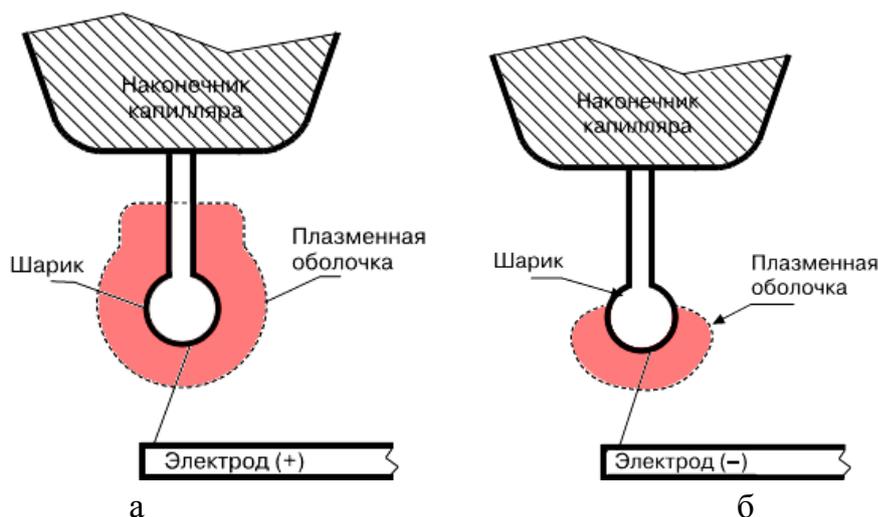


Рис. 10.13. Формирование шарика с использованием положительной полярности (а) и отрицательной полярности (б) на электроде

В установках ведущих фирм таких как K&S (США), TPT (Германия), F&K DELVOTEC (Германия), ESEC (США) и др. используют исключительно БФШ отрицательной полярности, формирующие на выходе высоковольтный импульс отрицательной полярности [10]. Формирование шариков при такой полярности исключает вышеописанные недостатки, поскольку плазменная оболочка окружает только нижнюю половину шарика, что позволяет исключить повреждение капилляра и минимизировать отжиг перехода проволока-шарик.

Обычно в БФШ отрицательной полярности используется источник тока разряда и таймер, корректирующий время разряда при изменении разрядного промежутка между концом проволоки и разрядником. Таким образом, преимущество БФШ отрицательной полярности – это возможность получения шарика малого размера (особенно на проволоках диаметром менее 20 мкм), исключение повреждения проволоки над шариком и уменьшения износа наконечника капилляра.

Величина предварительной деформации играет определяющую роль в процессе сварки. При слишком сильной начальной деформации (до ввода УЗ-колебаний) существенно изменяется кристаллическая структура металла подложки (контактной площадки кристалла) и самой проволоки, и соответственно, ухудшается качество сварного соединения. Для определения момента контакти-

рования инструмента с точкой сварки, в установке микросварки используется контактный датчик с программируемым усилием контактирования. Предусмотрена также возможность использования сигнала касания от УЗГ по изменению импеданса УЗ преобразователя в момент контактирования инструмента с точкой сварки. Этот способ определения момента контактирования используется в автоматических установках ЭМ-4020М и ЭМ-4370. В автоматических установках ТЗС “шарик-клин” ЭМ-4260 и ЭМ-4360 для определения момента контактирования используется прецизионный индуктивный датчик перемещения, позволяющий определять момент контактирования с точностью до 1 мкм.

При подаче УЗ колебаний образование сварного соединения определяется, с одной стороны, колебательной скоростью, прикладываемым усилием к инструменту и временем сварки. Ввод энергии ультразвука в сопряженные на малом участке металлы вызывает повышение температуры в зоне их контакта, растрескивание твердых и выгорание жировых пленок, пластическое деформирование материала, интенсивную диффузию, рекристаллизацию и другие явления. Таким образом, УЗ колебания прежде всего создают условия для быстрого формирования физического контакта и разрушения оксидных пленок свариваемых поверхностей. Одновременно, с этим происходит активация контактных поверхностей, приводящая к образованию очагов взаимодействия в условиях пластической деформации свариваемых материалов.

При сварке шарик–клин взаимодействие свариваемых металлов происходит практически по всей поверхности контактирования. В случае сварки клин-клин взаимодействие свариваемых материалов происходит в основном по периметру сварного соединения, поэтому к выбору рабочего торца микроинструмента подходят с особой тщательностью. Для лучшей центровки проволоки под торцом микроинструмента на рабочей поверхности инструмента делается центрирующая канавка и деформация проволоки в таком месте меньше. Применяют высококачественные микроинструменты фирм K&S и GAISER TOOLS, обеспечивающие присоединение типа шарик-клин и клин-клин (рис.10.14).

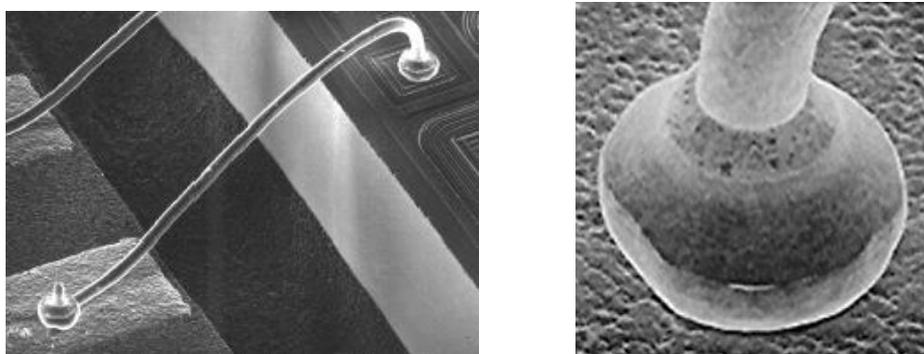


Рис. 10.14. Присоединения шарикового объемного вывода к контактной площадке

10.6. Автоматическое оборудование микросварки

Для сборки ИС массовых серий разработаны автоматы присоединения выводов ЭМ - 4060П и ЭМ - 4020П, в которых используется единая стойка управления, состоящая из однотипных блоков управления, распознавания, питания ультразвуковых генераторов (УЗГ), применены также однотипные загрузочно - разгрузочные устройства (ЗРУ) и оптико - телевизионные системы.

Система технического зрения позволяет распознавать и определять положение кристаллов ИС и траверс. Положение корпуса определяется по одной траверсе при смещении только по линейным координатам, и по двум траверсам - при смещении по линейным координатам и углу. СТЗ может определять положение каждой траверсы индивидуально.

Усовершенствованная УЗ система автоматов имеет непрерывную АПЧ в полосе не менее 5 кГц с погрешностью отслеживания частоты резонанса УЗ преобразователя (УЗП) не более 20 Гц и времени захвата не более 20 мс. Встроенная модернизированная система контроля функционирования и компенсации ошибок АПЧ позволяет вдвое (по сравнению с ЭМ-4020Б) уменьшить максимальную длительность компенсации ошибок АПЧ (время модуляции), увеличивает устойчивость АПЧ и обеспечивает заблаговременную сигнализацию об отказе системы. Имеется датчик, сигнализирующий о создании требуемого акустического контакта между инструментом УЗП и соединяемыми деталями и позволяющий не только определить позицию сварки по координате Z, но и увеличить воспроизводимое качество соединений.

Подача на инструмент ультразвука (дежурного сигнала) в промежутках между сварками снижает трение между инструментом и проволокой при формировании петли, облегчает отделение инструмента от сформированного соединения. Встроенное устройство контроля сварочных систем, программно и аппаратно поддержанное управляющей системой установки, позволяет осуществить функциональное диагностирование УЗ системы и непрерывное наблюдение за ходом процесса формирования каждого сварного соединения и на этой основе осуществить 100%-й контроль качества соединений ИС в любом корпусе.

Автоматическое уменьшение амплитуды колебаний инструмента УЗП по мере образования соединения в сочетании с малой длительностью сварки позволяет устранить усталостное разрушение материалов в зоне сварки, что увеличивает выход годных и стойкость инструмента. Система согласования УЗГ и УЗП в совокупности с широкой полосой АПЧ обеспечивает стабильность эксплуатационных свойств УЗ системы. Работа сварочных автоматов при повышенных скоростях перемещения ИС, а также в отсутствие оператора повышает требования к гарантированному совмещению проволоки с контактной площадкой, требуемой деформации соединения и обеспечению заданной формы петли проволочной перемычки.

Структурная схема установки присоединения проволочных выводов

приведена на рис. 10.15. Основными режимами установки являются: автоматический, полуавтоматический, ремонт, а также ряд вспомогательных, позволяющих запрограммировать установку на разварку определенного типа прибора.

В автоматическом режиме загрузочно-разгрузочное устройство (ЗРУ) осуществляет подачу в рабочую зону прибора предназначенного к разварке проволочными выводами. Система технического зрения распознает и определяет положение кристалла и корпуса. По окончании разварки ЗРУ подает очередной прибор в рабочую зону.

В полуавтоматическом режиме введение коррекции на положение кристалла или прибора относительно инструмента выполняется оператором, который совмещает визир сначала с первой, затем со второй, наиболее удаленной от первой контактной площадки кристалла ИС. Оператор дает команду на выполнение разварки прибора после окончания совмещения, а также подачу очередного прибора на рабочую позицию после окончания разварки проволочных выводов.

При ремонте прибора оператор разваривает выборочную проволочную перемычку. Если ремонт одного или нескольких выводов осуществляется на том же приборе, на котором производится автоматическая разварка, и коррекция на его положение введена, то от оператора требуется определить только номер ремонтируемого вывода и удалить, если это необходимо, оборванный вывод. В противном случае он с помощью визиров вводит поправки на неточное положение кристалла и корпуса прибора.

Количество вспомогательных режимов может быть достаточно большим, и связаны они с изменением циклограммы работы, введением данных в систему технического зрения, проверкой работоспособности установки и т.д.

В оборудовании УЗС используются различные системы управления: централизованные, иерархические, распределенные (с микропроцессорными управляющими устройствами). Их отличительной особенностью являются большое количество преобразований систем координат (пространственной, в которой расположен объект, механической системы координат привода, пространственной системы после оптического преобразования изображения объекта, электрической системы ТВ датчиков и преобразования в видеосигнал).

Анализируя основные характеристики установок присоединения проволочных выводов, сравнительно несложно предсказать тенденции развития этого оборудования. Вполне достижимо формирование проволочной перемычки и автоматическое определение положения кристалла ИС за 0,1-0,15 с, воспроизводимость позиционирования сварочного инструмента при автоматическом определении положения кристалла менее 0,015 мм, автоматическое масштабирование механической и телевизионной систем координат и т.д. [8].



Рис. 10.15. Структурная схема установки УЗ проволочных выводов

Автомат ЭМ–4260 (рис. 10.16, а) предназначен для автоматического присоединения проволочных выводов из золота к контактным площадкам и вывода корпусов ИС методом термозвуковой сварки. Двухкоординатный X – Y линейный шаговый двигатель с датчиками обратной связи обеспечивает высокую точность и скорость перемещения сварочной головки, Перемещение сварочного инструмента по координате Z осуществляется с помощью "звуковой катушки" с обратной связью. Автомат оснащен системой контроля качества сварки. Основные параметры технологического процесса (скорость перемещения, диаметр шарика, усилие сварки и др.) программируются. Встроенная программно–управляемая библиотека петель и высокая точность исполнительных механизмов обеспечивают разварку различных типов изделий с длиной перемычки ("петли") до 7 мм, в том числе многовыводных СВИС в тонких корпусах. Подача обрабатываемых рамок – магазинная с программируемой переналадкой, конфигурация рамок не регламентируется.

Автомат ЭМ – 4480 (рис. 10.16, б) осуществляет автоматическое присоединение алюминиевых проволочных выводов большой номенклатуры изделий, требующих большого поля, повышенной точности монтажа выводов, в том числе многокристалльных и многоуровневых ГИС, УЗ сваркой внахлест. Обеспечивает требуемую динамику формообразования выводов, снижение влияния механических вибраций на инструмент и "мягкого" касания за счет применения легкой, размещенной отдельно от приводов X, Y, Z – вращающейся сварочной головки, а также автоматическое определение положения контактных площадок кристаллов, траверс и многоуровневых изделий, индивидуальное

программирование режимов присоединения и формы петель для каждого вывода.



а

б

Рис.10.16. Автоматы присоединения проволочных выводов: ЭМ–4260 (а) и ЭМ–4480 (б)

Автомат универсален за счет использования многоместных матричных кассет и большого рабочего поля и имеет самодиагностику основных функциональных устройств.

Установки 1484 и 1470 фирмы Kulicke and Soffa Industries (США) для монтажа проволочных выводов, созданные в 90-е годы, обладают высокими уровнями скорости, точностью, надежностью и высокой производительности. В них используется микропроцессорное управление, которое в сочетании с вращающейся соединяющей головкой и телевизионной системой контроля с программируемым фокусом делают модели исключительно удобными в эксплуатации. Установка 1484 обеспечивает термозвуковую сварку при сравнительно низких температурах (200-240°С). Такие же возможности имеются и у установки ЭМ–4360К при температуре нагрева 100–400°С (рис. 10.17).

В настоящее время в связи со снижением серийности выпуска ИС и повышением их функциональной сложности возрос интерес к настольным универсальным установкам УЗ микросварки. Основная область применения данных машин — мелкосерийное производство гибридных микросборок. Как правило, подобные изделия поступают на микросварку выводов уже после установки кристаллов в корпус, что часто требует выполнять сварку в глубоких полостях и колодцах. Для того чтобы обеспечить возможность сварки в таких местах, установки могут быть оснащены различными модификациями «глубокого» доступа с максимально допустимой глубиной 25,4 мм. Данные установки могут быть оснащены специальным инструментом для сварки плоской лентой, что особенно важно

в силовой микроэлектронике, где существует необходимость в повышении значений максимально допустимого тока и предъявляются особые требования к жесткости соединения при одновременном сохранении прежних размеров корпуса.

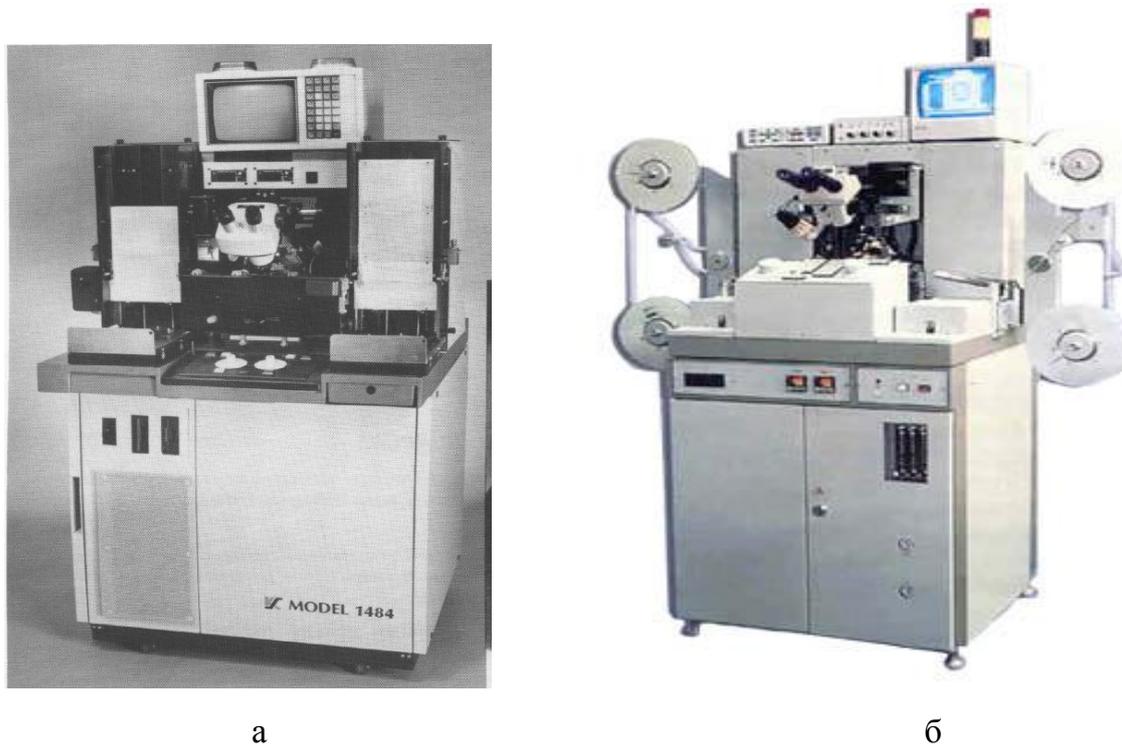


Рис. 10.17. Автоматы ТЗС модели 1484 (а) и ЭМ–4360К (б)

Учитывая требования современного производства электронных изделий и опыт использования установок модельного ряда типа ЭМ-4320 в УП «КБТЭМ-СО» ГНПО «Планар» разработано новое поколение полуавтоматических установок микросварки ЭМ-4320У и ЭМ-4320У-01. Установка ЭМ-4320У (рис. 10.18), является универсальной, совмещающая три способа сварки: термозвуковую методом «шарик-клин», «клин-клин» и контактную сварку. Установка комплектуется тремя быстросменными сварочными головками, обеспечивающие присоединение выводов из золота и алюминия диаметром 17,5–75 мкм. Программное обеспечение позволяет в меню установки быстро выбрать соответствующий способ сварки. Для формирования качественных микросварных соединений установка содержат следующие механизмы и системы [11]:

1. Прецизионный моторизованный механизм дозированной бездефектной подачи проволоки с использованием стандартных 2-х дюймовых катушек с проволокой фирм SPM (Малайзия) и HERAEUS (Германия).

2. Прецизионные привода по Z и Y координатам с дискретностью 1 мкм и быстродействующим датчиком касания для определения момента контактирования рабочего инструмента с местом сварки, обеспечивающего минимальную деформацию проводника до начала сварки.

3. Сварочные головки с программируемым устройством нагружения, обеспечивающие минимальное усилие при касании на сварную точку 5–10 г и

необходимый профиль сварочного усилия (постоянный, трапецеидальный, ступенчатый) с дискретностью задания нагрузки не более 0,1 г в диапазоне 5–150 г, и содержащие программируемый привод отрыва-подачи проволоки, обеспечивающий подачу проволоки под инструмент с точностью 3–5 мкм.

4. УЗ генератор с диапазоном частот 60–120 кГц и выходной мощностью 2,5 Вт с дискретностью установки 0,001 Вт. Для снижения температуры сварки до 100–150°C разработан модельный ряд УЗ преобразователей с повышенной частотой резонанса в диапазоне 95 кГц±5 кГц и низким импедансом (10–25 Ом).

5. Датчик контроля деформации проводника в процессе сварки и устройство контроля сигнала датчика на основе микроконтроллера, что позволяет по сигналу датчика деформации оптимизировать процесс микросварки.

На сегодняшний день на мировом рынке имеется широкий выбор настольных полуавтоматических установок, в том числе ведущих мировых производителей, таких как Kulicke & Soffa Industries (K&S) — лидера в области производства оборудования для микросварки проволочных выводов, ТРТ (рис. 10.19) и др. Установки серии 4500 оснащены цифровой системой управления, способной хранить до двух сотен программ сварки и осуществлять программирование стежков разного типа и размеров.

Установки мод. НВ16 ТРТ и мод. 4500 К&S обладают высокой универсальностью: можно выполнять сварку методами “шарик-клин” и “клин-клин” в одной установке без смены сварочной головки и установки программного обеспечения [12]. Соответствующая программа управления вызывается из памяти программ. Однако, это возможно при разварке методом “клин-клин” при вертикальной подаче проволоки (подача под 90°). При стандартной подаче под углом 30°/45° необходимо установить соответствующий механизм отрыва – подачи.



Рис. 10.18. Универсальная установка микросварки ЭМ-4320У



Рис. 10.19. Установки термозвуковой сварки мод.4524AD K&S (а) и HB16 TPT (б)

Основным показателем, характеризующим установки в наибольшей степени, является производительность. Часовая производительность для приборов, имеющих перемычки не более 1,5 мм, ориентировочно может быть рассчитана по формуле

$$\Pi_r = \frac{3600}{t_c + t_{\text{п}} + N(t_o + t_1 + t_2)}, \quad (10.4)$$

где t_o – время формирования одной перемычки; t_c – время автоматического определения положения кристалла ИС; $t_{\text{п}}$ – время подачи прибора в рабочую зону; N – количество выводов; t_1 – время сварки на кристалле, с; t_2 – время сварки на траверсе, с.

10.7. Инструмент для микросварки

Общие требования, предъявляемые к инструментам: обеспечение концентрации энергии в зоне сварки; возможность визуального контроля процесса сборки прибора; высокая механическая прочность и износостойкость; удобство в эксплуатации. В зависимости от назначения и конструкции инструмента общие требования подразделяются на более конкретные частные, например, при термокомпрессионной сварке холодным инструментом для обеспечения концентрации энергии в зоне сварки он должен иметь минимальную теплопроводность, при сварке нагретым инструментом, наоборот, максимальную и т.д. Требования к инструменту для УЗС с точки зрения особенностей этого вида сварки можно сформулировать следующим образом:

– форма и размеры инструмента должны обеспечивать эффективную передачу энергии УЗ колебаний;

–материал инструмента должен обеспечивать минимальное затухание УЗ колебаний и не должен вступать во взаимодействие с материалом вывода.

Для сохранения спектра собственных частот и вида колебаний (в частности, изгибных) необходимо соблюдать условие [13]:

$$\frac{\lambda}{d} > (8-10), \quad (10.5)$$

где λ – длина волны изгибных колебаний; d – диаметр сечения инструмента.

Для расчета длины инструмента УЗС используют уравнение Олсона:

$$f = \frac{1,133\pi \cdot \kappa}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{3,56 \cdot k}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (10.6)$$

где f – частота; L – длина инструмента; E – модуль Юнга; k – радиус инерции поперечного сечения; ρ – плотность материала.

Часто длина инструмента, определенная из уравнения Олсона, оказывается слишком малой из чисто практических соображений (инструмент должен иметь отверстие для подачи проволоки, достаточную длину для закрепления, вылет). В этом случае рекомендуется рассчитывать инструмент на частоту, для которой основная частота УЗ генератора является второй гармоникой:

$$f_p = \frac{f_0}{5,404}, \quad (10.7)$$

где f_0 – основная частота, f_p – расчетная частота.

Практика показывает, что наиболее стабилен в работе инструмент длиной 21 мм. В этом случае длину инструмента определяют по формуле

$$f = \frac{(7,85)^2 k}{2\pi d^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (10.8)$$

Множитель $7,85^2$ соответствует первой нечетной гармонике.

Форма заточенной части инструмента также имеет существенное значение для обеспечения стабильности сварки. При использовании инструмента с длиной клиновидной части 5–7,5 мм плоскости пучностей и узлов изгибной волны смещаются по длине инструмента, приводя к нестабильности. Высоту клина рекомендуется выбирать не более 2,8 мм.

Для термозвуковой сварки рекомендуются рубиновые капилляры, имеющие более высокую износостойкость рабочих поверхностей, коррозионную стойкость и чистоту поверхности (рис. 10.20, а). Обозначение капилляра: КТ51 - 25 - 150 - 2 - 30: Т - термокомпрессионная сварка, 25 - диаметр проволоки, 150 - диаметр D, 30 - размер R.

Определенные требования предъявляются и к материалу инструмента для УЗС. Материал должен иметь высокую скорость распространения УЗ колебаний, низкий коэффициент затухания.

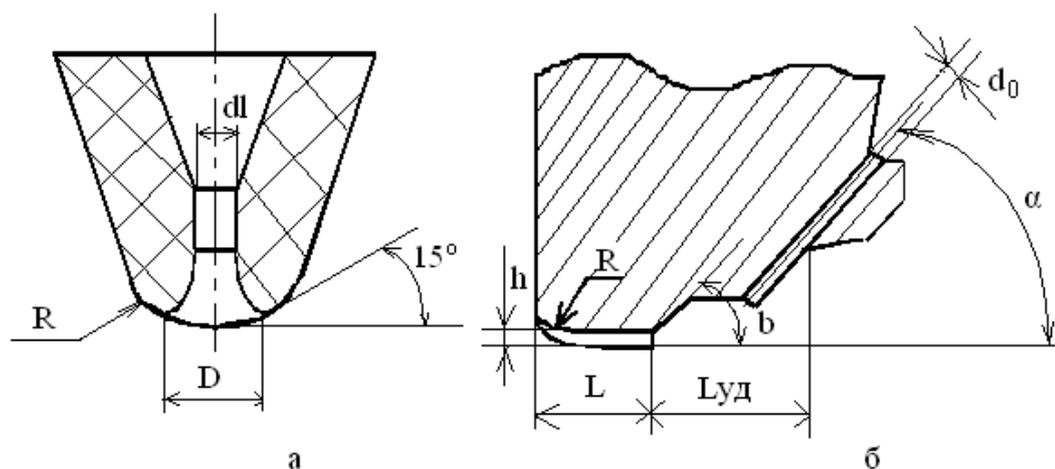


Рис. 10.20. Рабочая часть инструмента для ТКС (а) и УЗС (б)

Как известно, амплитуда УЗ колебаний убывает в зависимости от расстояния по закону

$$A = A_0 \cdot e^{-\delta x}, \quad (10.9)$$

где δ - коэффициент затухания.

В свою очередь коэффициент затухания определяется коэффициентом поглощения δ_n и коэффициентом рассеяния δ_p

$$\delta = \delta_n + \delta_p, \quad (10.10)$$

причем при $\lambda > 10D$ $\delta_n = C_1 \cdot f$; $\delta_p = C_2 \cdot f^4 \cdot D^3$, где D – средний размер зерна материала; C_1, C_2 – постоянные.

Функциональные особенности инструмента для УЗС определяются следующими факторами (рис. 10.20, б) [10]:

– диаметр направляющего отверстия – устранением возможности забивки его материалом привариваемой проволоки:

$$d_0 \geq 1,5 d_{np}, \quad (10.11)$$

– угол наклона направляющего отверстия – условиями перемещения инструмента на вторую сварку, зависит от высоты и длины проволочной перемычки:

$$\alpha = \arctg(h/g), \quad (10.12)$$

где h - высота проволочной петли; g - перемещение стола,

– длина рабочей части инструмента h - длиной деформируемой при сварке проволоки и выбирается из соотношения

$$h = (2) d_{np} \quad (10.13)$$

оптимальная величина $h = 0,1$ мм для проволоки 27 мкм и 0,2 для 60 мкм;

– глубина продольного паза - коэффициентом деформации $k_d = 0,5-0,6$:

$$R = 0,01 - 0,05 \text{ мм}; \quad (10.14)$$

для обеспечения симметрии петли проволочной перемычки удаление выхода отверстия от задней кромки рабочей площади должна удовлетворять соотношению

$$L_{уд} = 8 d_{np} \quad (10.15)$$

– угол наклона задней кромки рабочей площадки b – обеспечением подрезки проволоки после второй сварки без остаточных напряжений в ней (60 градусов).

Для присоединения внахлест проволоки из алюминиевых сплавов УЗ микросваркой применяют капилляры из твердых сплавов типа ВК 20 с упрочненной рабочей поверхностью, имеющие обозначение КУТ32 - 27 - 95 - 15 (капилляр для УЗ и термозвуковой сварки: 27 - диаметр проволоки, 95 - размер h , 15 - размер R).

Фирма Kulicke & Soffa Industries - ведущий производитель оборудования проволочного монтажа изделий электроники для формирования межсоединений тонкими золотыми и медными проводниками термозвуковой микросваркой вместо сборного преобразователя с болтовым соединением элементов предложила использовать пьезоэлектрический преобразователь в виде цельного корпуса, в котором закреплены четыре кубика прямоугольной пьезокерамики PZT8 [14] (рис. 10.21).

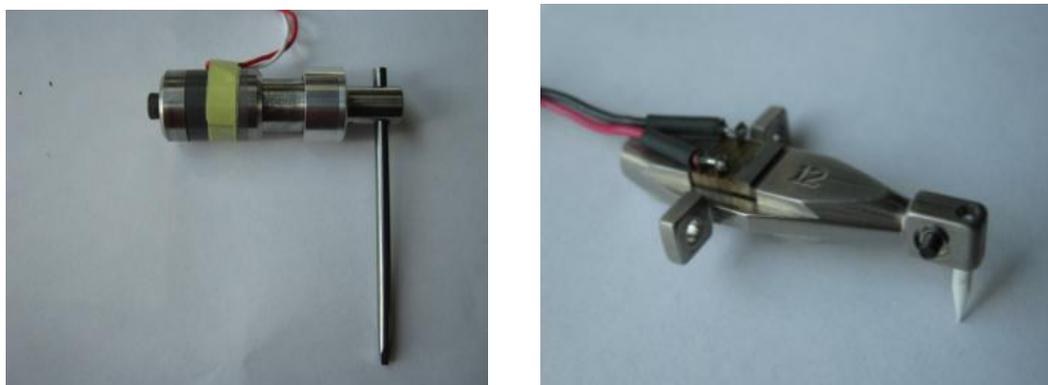


Рис. 10.21. Внешний вид УЗ преобразователей для микросварки: сборный (а) и в цельном корпусе (б)

Новый УЗ преобразователь содержит твердое металлическое неразъемное устройство, имеющее прямоугольное отверстие в центре между наконечником инструмента и сбалансированным концом. Пачка пьезоэлектрических кристаллов установлена в прямоугольном отверстии между поперечными сторонами и отделена от осевых сторон апертуры (рис.10.22). Микросварочный инструмент монтируется в цилиндрическом отверстии на монтажном конце преобразователя и плотно механически соединен с монтажным концом с помощью винта. так, что стопку пьезоэлектрических кристаллов акустически соединяют посредством неразъемного соединения с инструментом для склеивания в цилиндрическом отверстии плотно соединенным монтажные поверхности

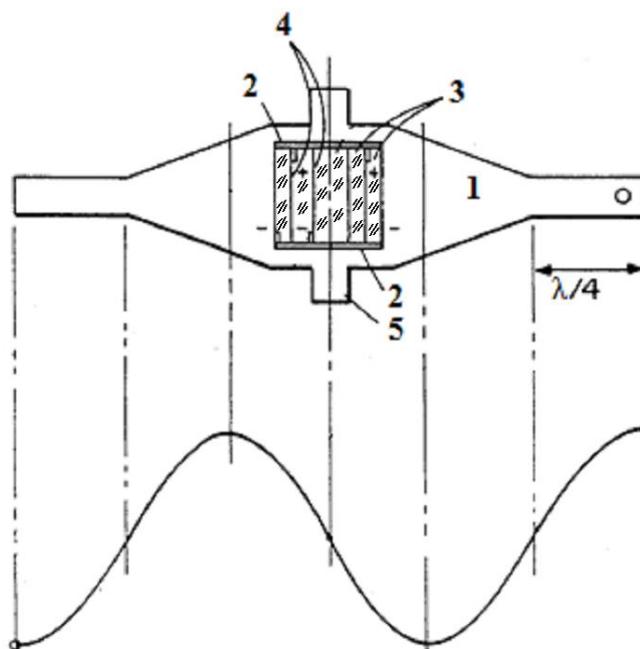


Рис. 10.22. Схема УЗ преобразователя в цельном корпусе с наложенной характеристикой смещения в $3/2$ длины волны: 1 – корпус преобразователя, 2 – прямоугольное отверстие для пьезоэлектрических кристаллов, 3 – пьезоэлектрические кристаллы, 4 – электропроводящие прокладки, 5 – монтажный фланец

10.8. Микросварка расщепленным электродом

Сварку расщепленным (сдвоенным) электродом применяют в технологии электрического монтажа, в частности при получении контактных соединений планарных выводов ИС и ЭРЭ с контактными площадками плат, плоских ленточных проводов с выводами печатных разъемов и др. Метод пригоден для сварки таких материалов, как медь, серебро, золото, алюминий, никель толщиной 0,03–0,5 мм. Подготовка свариваемых поверхностей заключается в предварительном отжиге материалов для снятия внутренних напряжений и увеличения пластичности, обезжиривании поверхностей химическими растворами. Сварка выполняется электродом, изготовленным из вольфрама или молибдена в виде двух токопроводящих частей, разделенных зазором $h = 0,02–0,25$ мм, либо с помощью диэлектрической прокладки (рис. 10.23).

Сварку осуществляют одним или несколькими импульсами конденсаторного разряда с различной длительностью, мощностью и интервалами между импульсами. Усилие прижима электродов при сварке 0,2–1,5 Н создается в момент нагрева до максимальной температуры и снимается до окончания действия импульса тока.

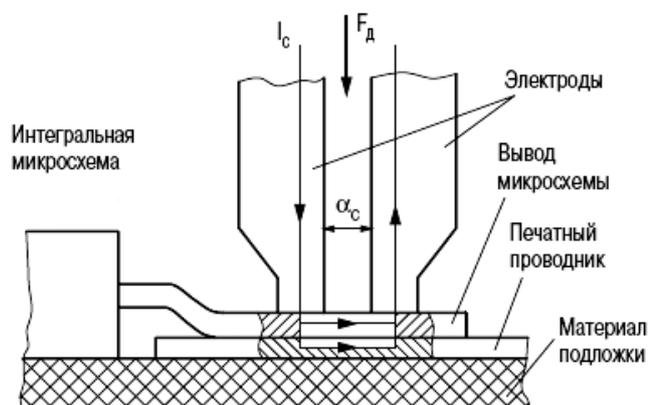


Рис. 10.23. Схема сварки расщепленным электродом: 1 – электроды; 2 – вывод ИМС; 3 – контактная площадка, 4 – плата

При этом ИС и ПП получают незначительную термическую нагрузку. Сварку проводят на установках ЭМ-425А, ЭМ-220, ЭМ-441 (800–2300 сварок в час) при длительности сварочного импульса 0,02–0,8 с.

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

$$Q = I^2 R t, \quad (10.16)$$

где $R = R_K + R_D + R_M$, t – время сварки; R_K – контактное сопротивление электродов с деталью; R_D – сопротивление свариваемых деталей; R_M – сопротивление между свариваемыми деталями.

Для образования сварного ядра необходимо заставить ток протекать через нижний слой свариваемых деталей. Это достигается установкой зазора между электродами α_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 постоянно меняются, то это приводит к невоспроизводимости качества сварных соединений. Поскольку медные контактные площадки на печатной плате имеют относительно большую проводимость, их нагрев затруднен. Поэтому необходимо 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 необходимо 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 поверхностей 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.

Режимы микросварки расщепленным электродом приведены в табл. 10.4.

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.

Таблица 10.4. Оптимальные режимы сварки расщепленным электродом.

Соединяемые металлы		Температура, °С	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

10.9. Лазерная микросварка

Прогрессирующая микроминиатюризация современных микроэлектронных устройств и повышение требований к качеству продукции приводят к активному использованию методов лазерного воздействия. Современный инструментарий позволяет локально и прецизионно воздействовать на материалы, используя особенности их энергетических спектров. Это расширяет возможности применения лазерной микросварки. Лазерную микросварку применяют для проводов в полиуретановой изоляции, коваровых и никелевых выводов радиоэлементов с контактными площадками, плат, проволочных выводов ИС внахлестку, проволоки малых диаметров из золота, меди, алюминия с напыленными на керамику, стекло, ситалл металлическими слоями и т.п.

Преимущества лазерного излучения:

- высокая локализация мощности в зоне нагрева (до 1000 МВт/м²);
- безынерционность воздействия, что позволяет вести нагрев импульсами малой длительности (1–10 мс) и очень точно дозировать энергию излучения;
- очень малая зона термического влияния (0,03–0,25 мм) при минимальном диаметре пятна нагрева 0,01 мм;

- не требуется вакуум, работа может выполняться в атмосфере любого состава;
- возможны соединения материалов с существенными различиями оптических, теплофизических и механических свойств;
- автоматизация процесса за счет применения микропроцессоров и транспортных систем.

Источником лазерного излучения являются оптические квантовые генераторы (ОКГ), которые по агрегатному состоянию рабочего вещества подразделяются на газовые, жидкостные и твердотельные. В зависимости от способов возбуждения рабочего вещества ОКГ работают с оптической либо химической накачкой в непрерывном или импульсном режиме, а также в режиме синхронизации модуляции.

ОКГ на неодимовом стекле и рубине имеют высокую удельную мощность (до 10 000 МВт/м²), однако их применение ограничено из-за низких эффективности и частоты следования импульсов. ОКГ на алюмоиттриевом гранате (АИГ) имеют рабочую длину волны 1,06 мкм и обеспечивают удельную мощность до 1000 МВт/м² в сочетании с высокой частотой следования импульсов (до 20 Гц) благодаря низкому порогу накачки и хорошей теплопроводности рабочего вещества. Газовый лазер на СО₂ работает с еще большей эффективностью как в непрерывном, так и в импульсном режиме, однако его излучение длиной волны 10,6 мкм хорошо отражается металлами [15].

Мощность лазерного излучения 125 Вт достигается благодаря использованию двух активных элементов в излучателе. Коэффициент пропускания выходного зеркала (до 20 %) является оптимальным и обеспечивает максимальную мощность лазерного излучения при номинальной силе тока, проходящего через лампу накачки.

Интенсивность лазерного излучения, проникающего в материал, убывает по экспоненциальному закону

$$I(x) = I_0 k \cdot e^{-\gamma \cdot x}, \quad (10.17)$$

где x – глубина проникновения, I_0 – интенсивность лазерного излучения на поверхности, k – коэффициент поглощения, γ – степень поглощения.

В металлах кванты света поглощаются в основном электронами проводимости, которые рассеивают поглощенную энергию на тепловые колебания решетки за время 10^{-11} - 10^{-10} с, благодаря чему поглощенная энергия быстро переходит в теплоту. Степень поглощения для металлов порядка 10^7 м⁻¹, поэтому энергия выделяется в слое толщиной около 10^{-7} м и лазерное излучение можно рассматривать как локальный источник тепловой энергии на поверхности. Размер нагретой зоны на первом этапе определяется глубиной проникновения излучения в среду, а затем растет за счет теплопроводности. С ростом температуры поверхности значение коэффициента поглощения увеличивается и составляет для металлов при температуре 500⁰С и длине волны излучения 1,06 мкм 0,35–

0,40, что дает возможность нагревать их поверхность с возрастающей скоростью.

При импульсно-периодическом лазерном воздействии процесс нагрева тела описывается непрерывным источником теплоты, который представляется в виде серии действующих друг за другом мгновенных источников теплоты. Количество теплоты, введенное в поверхность за время t равно

$$Q = \int_0^{\tau_u} \eta P(t) dt, \quad (10.18)$$

где τ_u – длительность импульса, η – КПД лазерного нагрева, P – мощность лазерного излучения.

Плотность мощности лазерного воздействия зависит в значительной степени от диаметра луча d

$$P = \frac{4E}{\pi \cdot d^2 \cdot \tau_u}, \quad (10.19)$$

где E – энергия в импульсе, которая для плавления без выплеска равна

$$E = \frac{0,885 T_{пл} \cdot \lambda \cdot \pi \cdot r^2}{\sqrt{a \cdot \tau_u}}, \quad (10.20)$$

где $T_{пл}$ – температура плавления материала, λ – коэффициент теплопроводности, $a = \lambda / c\gamma$ – коэффициент температуропроводности ($c\gamma$ – объемная теплоемкость), r – радиус пучка лазерного излучения.

Для импульсного лазерного источника энергия находится в пределах 10^{-2} - 10^3 Дж. Теоретически рассчитана зависимость величины поглощаемой энергии лазерного излучения от радиуса луча в зоне формирования соединений лазерной микропайкой и сваркой (рис. 10.24). При радиусе луча 2 мм величина поглощаемой энергии отличается почти в 2 раза.

Экспериментальные исследования процесса микросварки контактов реле из бериллиевой бронзы показали, что глубины проплавления материала линейно зависят от энергии излучения лазера при постоянных длительности импульса 4 мс и диаметре лазерного пучка 0,5 мм и составляет 0,2–0,5 мм. При увеличении энергии прочность соединений сначала растет до 49 МПа, что связано с увеличением глубины и диаметра зоны проплавления.

Однако когда энергия излучения больше 3 Дж, плотность мощности оказывается достаточной для выброса части расплавленного металла из сварочной ванны вследствие интенсивного испарения, поэтому площадь сечения сварной зоны, а вместе с ней и прочность уменьшаются [16]. При разработке технологии лазерной сварки деталей микроэлектронных изделий необходимо учитывать требование создания качественного контура сварки, вид покрытия места сварки, условия подачи технологического газа.

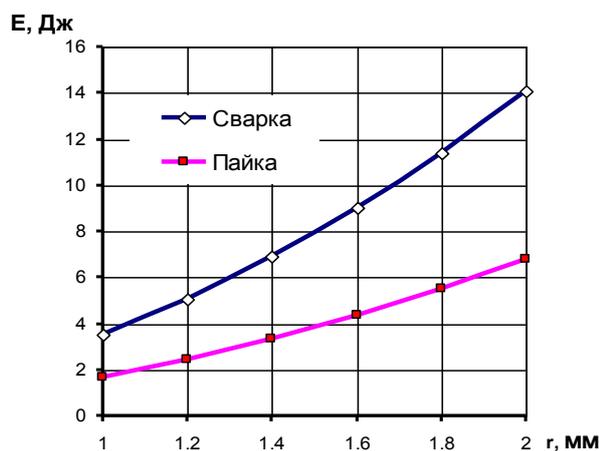


Рис. 10.24. Зависимость величины поглощенной энергии лазерного излучения от радиуса луча и типа соединения

Рекомендуемый диаметр лазерного луча на поверхности свариваемых деталей составляет $d = 0,3$ мм. Величина максимальной глубины проплавления определяется из тепловых условий как [17]:

$$h = \frac{d}{4} \left(\frac{T_k}{T_{нл}} - \frac{T_{нл}}{T_k} \right), \quad (10.21)$$

где T_k – температура кипения материала.

Факторы, оказывающие значительное влияние в лазерной микросварке, распределяются по группам: параметры лазера, материалы контактных пар, расположение контактной пары, поверхностные свойства и влияние среды. Рекомендуемая длительность импульсов от 0,5 до 5 мкс, удельная мощность от $5 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^5$ Вт/см². Из оптических и тепловых свойств свариваемого материала решающими являются его поглощающая способность и теплопроводность. Лучше свариваются металлы и сплавы с высоким электрическим сопротивлением и низкой отражательной способностью [18].

В условиях лазерно-плазменной обработки материалов возникает особый тип разряда – комбинированный лазерно-дуговой. Он отличается своими свойствами от обычной плазменной дуги и оптического разряда, поддерживаемого лазерным излучением. На установке «Квант-15» при диаметре луча 0,3 мм, длительности импульса 4 мс, энергии импульса излучения 0,65 Дж и расходе аргона 0,5–0,7 л/с глубина проплавления составляет 0,1–0,15 мм. Учитывая потери лазерного излучения на отражение от полированных поверхностей деталей (0,63–0,75), а также потери в оптической системе резонатора лазера (0,8–0,95) полная энергия, потребляемая от установки, не превышает 5 Дж.

Промышленность выпущен ряд автоматов лазерной сварки и пайки с программным управлением на базе лазера ЛТН-102А: для сварки — "Квант-10", "Квант-12" с энергией излучения до 15 Дж и частотой 60 импульсов в секунду,

для пайки – "Квант-50", "Квант-52" производительностью до 330 соединений в минуту и мощностью излучения 125 Вт.

В настоящее время созданы компактные настольные лазерные станции с волоконной передачей излучения в места сварки, программированием длительности импульса в пределах 0,4–30 мс, частоты следования 0,5–20 Гц и удельной мощности излучения при максимальной пиковой мощности 4 кВт.

Очень высока эффективность лазерной микросварки тонких проводников разнотипных материалов: вольфрам-никель, платина-родий и др. с диаметром проволок от 250 до 500 мкм, а также соединения концов термопар. Характерным примером использования лазерной микросварки является соединение выводов обмотки якоря с коллектором электродвигателей малой мощности. При этом медные проволочные выводы диаметром 80 – 300 мкм укладываются в соответствующий паз в коллекторе из меди. Использование лазерной микросварки дало возможность обеспечить соединение выводов с коллектором без предварительного удаления изоляции.

Современная установка лазерной сварки WD-M180 (рис. 10.25,а) имеет выходную мощность 180 Вт, длительность импульса 0,5–25 мс, частоту импульсов 20 Гц, подачу защитного газа и микроконтроллерный процессор. Лазерные установки Alpha Laser (Германия) (рис. 10.25,б) отличаются мобильностью, хорошим дизайном и предназначены для широкого круга сварочных работ.



Рис. 10.25. Лазерные установки сварки: WD-M180 (а) и AL150 (б)

К недостаткам лазерного излучения относятся: сложность технологического оборудования; нестабильность лазерного излучения во времени; особые требования техники безопасности; возможность термической деструкции диэлектрического основания печатной платы из-за значительного поглощения лазерного излучения этими материалами; большая энергоемкость и малый КПД.

Список литературы к главе 10

1. Онегин Е.Е., Зенькович В.А., Битно Л.Г. Автоматическая сборка ИС. – Минск: Выш. школа, 1990. –383 с.
2. Мазур А.И., Алехин В.П., Шоршоров М.Л. Процессы сварки и пайки в производстве полупроводниковых приборов. – М.: Радио и связь, 1981. – 452с.
3. Шмаков М. Микросварка при производстве микросборок и гибридных интегральных микросхем // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – № 5. – С. 68–74.
4. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. Т.2. / С.П. Кундас, В.Л. Ланин, А.П. Достанко и др.– Минск: Бестпринт, 2003. – 224 с.
5. Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые / под ред. А.П. Достанко.– Минск: Бестпринт, 2009.– 199 с.
6. Ланин В.Л., Петухов И.Б., Мордвинцев Д.В. Повышение качества микросварных соединений в интегральных схемах с использованием ультразвуковых систем повышенной частоты // Технологии в электронной промышленности, 2010, №1.– С. 48–50.
7. Монтаж ленточными перемычками мощных полупроводниковых приборов / В. Л. Ланин, С. С. Волкенштейн, И. Б. Петухов, А. А. Хмыль // Компоненты и технологии. – 2008. – №12.– С. 76–79.
8. Шмаков М., Паршин В., Теплякова Е. Технология термозвуковой микросварки методом «шарик-клин-шарик» и контроль качества микросварных соединений // Технологии в электронной промышленности.– 2007. – № 7. – С. 70–72.
9. Ланин В.Л., Цинман А.Ф., Петухов И.Б. Выбор полярности электрического разряда при формировании шарика в установках присоединения проволочных выводов // Вестник ПГУ №3.– 2011.– С. 110–116.
10. Prasad S.K. Advanced Wirebond Interconnection Technology.– Norwell (USA), 2004.– 670 p.
11. Новое поколение установок ультразвуковой микросварки / В.Л. Ланин и др. // Технологии в электронной промышленности, 2011, № 8. – С. 36–40.
12. Васильев А. Kulicke@Soffa Industries – ведущий поставщик оборудования, технологий и материалов для микросварки проволочных выводов // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы, 2016, № 7. – С. 61–64.
13. Ланин В. Л., Петухов И. Б., Шевцов В. Ультразвуковое оборудование для сварки микропроводников // Компоненты и технологии, 2009, № 8.– С. 124–128.
14. DeAngelis, D.A. Advanced bode plot techniques for ultrasonic transducers / D. A. DeAngelis, G.W. Schulze // Physics Procedia. –2015. – № 63. –Р. 2–10.
15. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Лазерная сварка металлов.– М.: Высшая школа, 1988. – 207 с.

16. Ланин В.Л. Лазерная пайка и микросварка изделий электроники // Электронная обработка материалов.– 2005.– № 3. – С.79 – 84.
17. Рыжкин А., Илясов В., Чуларис А. Лазерная микросварка в электронике: опыт использования и перспективы // Фотоника.– 2009.–№ 2. –С. 10–14.
18. Weickert, F. Laserkontaktieren in der Mischelektronik / F. Weickert, P. Bartsch // Feingeratetechnik. – 1983. – 10(32). – S. 465–470.

ГЛАВА 11

НЕПАЯНЫЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ

11.1. Монтаж соединений накруткой

11.1.1 Конструкции соединений накруткой

Монтаж накруткой, разработанный в 1952 г. фирмой “Bell Laboratories” (США), предназначен для получения электромонтажных соединений с помощью одножильных проводов и штыревых выводов при сборке 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 и создает условия для его автоматизации.

Контактное соединение накруткой – соединение неизолированного провода с выводом, имеющим острые кромки, при котором провод навивается на вывод с определенным усилием. Электрический контакт возникает в зонах контакта провода с острыми кромками вывода (рис. 11.1). Натяжение провода при накрутке позволяет разрушить пленку оксидов на контактирующих металлах, способствует вдавливанию провода в острые кромки вывода и образованию газонепроницаемого соединения. Возможно соединение накруткой с применением провода с

тонкой изоляцией. Тогда изоляция прорезается острыми кромками вывода. Концентрация напряжения в зонах контакта и среднее давление до 700 МПа обуславливают взаимную диффузию металлов.



Рис. 11.1. Напряжения и деформация в зоне сжатия провода в накрутке

Соединения накруткой должны иметь [1]:

- минимальные номинальное и переходное сопротивления;
- газонепроницаемость для исключения коррозии;
- сумма площадей зон контакта должна быть больше поперечного сечения провода;
- электрическую 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 диаметром 0,17–1,2 мм, имеющий относительное удлинение не менее 20%. Рабочий участок провода освобождается от изоляции и облуживается. Кроме меди используют латунь, никелевое железо и никелевую проволоку.

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

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 (рис. 11.2). 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.

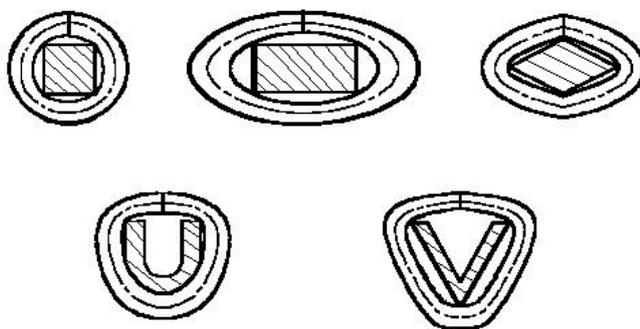


Рис. 11.2. Формы поперечного сечения выводов: квадратная (а), прямоугольная (б), ромбовидная (в), U-образная (г), V-образная (д)

Для обеспечения сопротивления скручиванию при навивке площадь поперечного сечения вывода должна быть не меньше площади сечения провода. Отношение диаметра жилы провода к стороне квадратного вывода обычно 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, параллельность сторон – 0,05–0,06 мм на длине 10 мм, отклонение от плоскостности – не более 0,25 мм [2].

Длина вывода определяется диаметром провода; числом витков в соединении; количеством соединений на выводе и составляет 12–38 мм. Чтобы обеспечить оптимальное число контактных поверхностей с площадью газонепроницае-

мых 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 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. 11.3). Немодифицированное соединение получают путем навивки на вывод неизолированного участка одножильного провода. Модифицированное соединение отличается 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 менее 2,5 мм, применение модифицированного соединения затруднительно.

Бандажное соединение состоит из нескольких витков бандажной проволоки. Провод при накручивании захватывает и обжимает штырь и вывод. Вывод должен прилегать к широкой поверхности штыря. Бандажное соединение применяется для образования контактных соединений с выводами навесных элементов, шинами питания и для монтажа многожильных проводов.

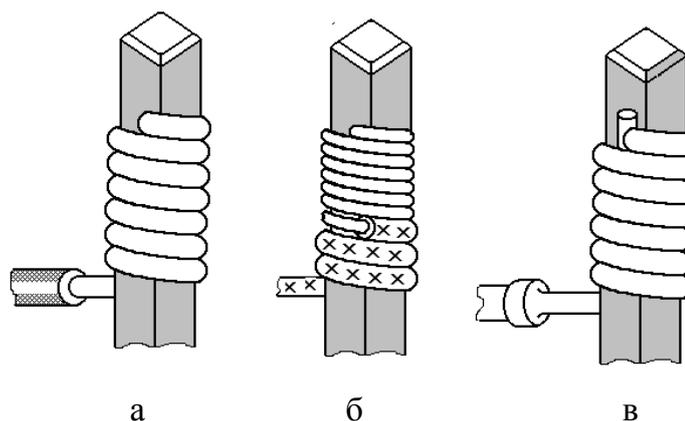


Рис. 11.3. Виды соединений накруткой

Штыри закрепляют в панели впрессовыванием или пайкой, так чтобы они прочно, без повреждений сопротивлялись возникающему во время накрутки крутящему моменту, а в дальнейшем – 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 показали, что в соединениях накруткой давление не снижается ниже 50% от исходного состояния спустя годы. Такое давление контактирующих поверхностей достаточно для обеспечения необходимой постоянной величины высокой проводимости.

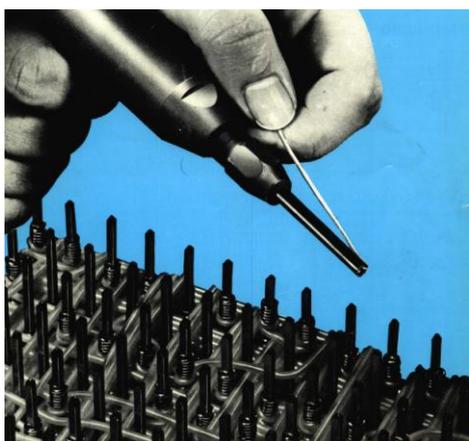
Если на штырь накручивается не один, а три накрутки, каждая из последующих на круток ослабляет предыдущую на 10–20%. Если соотношение размеров поперечного сечения штыря и диаметра и пластичности провода выбраны неправильно, первая (нижняя) накрутка может оказаться настолько ослабленной, что может сойти 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.

11.1.2. Технология и инструмент накрутки

Накрутку провода (рис. 11.4) производят в следующей последовательности:

– выбирают оправку пистолета, соответствующую конфигурации штыря и размеру провода;

– нарезают провода заданных длин и укладывают их в соответствующие ячейки кассы;



а



б

Рис. 11.4. Инструмент (а) и рабочее место накрутки (б)

- очищают провода от изоляции на заданной длине;
- вставляют провода в боковое отверстие оправки на глубину, определяемую длиной очищенного от изоляции провода;
- загибают провод вокруг втулки оправки, так чтобы он не закрывал отверстие, предназначенное для штыря, а свободный конец провода придерживают;
- по таблице соединений находят адрес штыря, с которого начинается соединение;
- оправку с проводом центральным отверстием насаживают на штырь, соответствующий началу цепи, и включают вращение оправки;
- находят второй адрес цепи, прокладывают провод между штырями и повторяют операцию накрутки.

Поскольку длина цепей разная, длина проводов также указывается в таблице соединений и выбирается из соответствующей ячейки кассы с проводами. Время накрутки составляет около 1 с, после чего оправку снимают со штыря. Продолжительность всей операции (введение провода, его изгиб, насаживание на штырь, накручивание, снятие инструмента) около 2,5 с. Если провода для накрутки подготовлены и разложены по ячейкам кассы, производительность накрутки составляет 1000–1400 соединений/час. Подготовка проводов на автоматах совпадает по производительности с ручной накруткой (1500 соединений/час).

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 двигаются таким образом, что оправка инструмента точно попадает в предназначенный для очередного соединения штырь. Монтажник насаживает оправку 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 касе проводов.

В процессах электромонтажа методом накрутки (рис. 11.5, а) возникают силовые и деформационные процессы. Провод 1 без усилия свободно вытягивается из бокового отверстия 2 наматывающего валика 3 и изгибается на его кромке с радиусом r , затем снова выпрямляется при сходе с него и изгибается под углом 90° на каждом ребре вывода 4 при вращении наматывающего валика 3 вокруг оси этого вывода. В наматываемый провод врезаются острые кромки вывода 4 под действием растягивающего осевого усилия накрутки. Так как в проводе при изгибе возникают осевые растягивающие и, как их следствие, контактные напряжения между проводом и наматывающим валиком, то возникают силы трения на тороидальной поверхности наматывающего валика и провода.

Контакт острых кромок вывода начинается с того момента, когда ось бокового отверстия наматывающего валика при накрутке смещается с линии 7 (рис. 11.5, б), являющейся продолжением сторон вывода. Составляющая усилия натяжения провода, параллельная стороне вывода, увеличивается от нуля до максимальной величины при подходе оси бокового отверстия валика к линии параллельной линии продолжения стороны вывода. Вторая составляющая, перпендикулярная ей, увеличивается от нуля до максимальной величины при совпадении оси бокового отверстия валика с осью симметрии вывода, а затем уменьшается до нуля при совпадении оси бокового отверстия валика с линией продолжения стороны вывода. Если первая составляющая обеспечивает врезание вывода в провод, то вторая составляющая прижимает проводник к выводу, а ее увеличение способствует пластическому деформированию смятием проводника в месте контакта его с выводом и увеличению поверхности контакта.

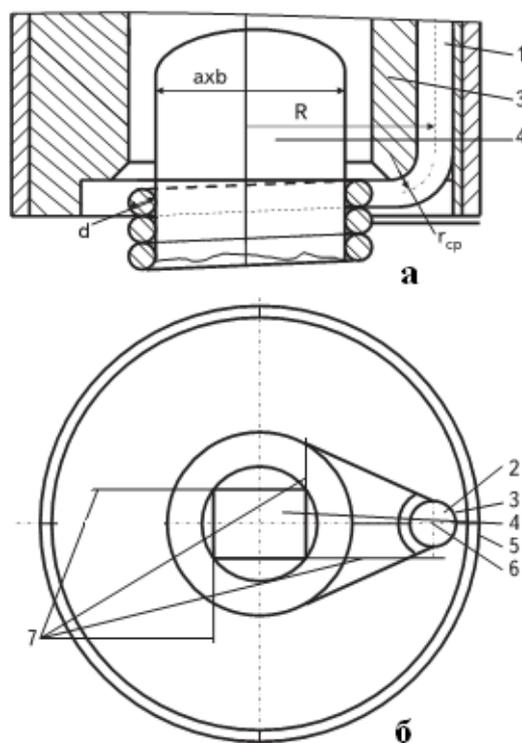


Рис. 11.5. Схема электромонтажа методом накрутки: осевой разрез (а) и вид снизу (б): 1– проводник; 2– отверстие для проводника; 3– наматывающий валик; 4– вывод; 5– втулка; 6– ось бокового отверстия валика; 7– линии продолжения сторон вывода

При выходе прямого проводника из бокового отверстия наматывающего валика провод изгибается на границе радиуса r с тороидальной поверхностью. Работа изгибающего момента M на угле поворота сечения γ должна быть равна произведению напряжения σ в нем на площадь сечения провода и пути перемещения элемента заготовки. Условие равенства работ может быть следующим [2]:

$$\Delta\sigma \times d \times r_{cp} \times d\gamma = M d\gamma \quad (1)$$

откуда

$$\Delta\sigma = M / (d \times r_{cp}) , \quad (2)$$

где d – диаметр наматываемого провода;

r_{cp} – средний радиус изгиба провода, равный $r+d/2$;

r – радиус рабочей кромки наматывающего валика, выбираемый в пределах 2–4 диаметров провода.

11.1.3. Контроль качества соединений накруткой

Соединения накруткой с целью проверки качества подвергаются электрическим и механическим испытаниям. К первым относятся испытания на переходное сопротивление и токовые перегрузки. Их проводят на постоянном токе, измеряя величину падения напряжения на соединении накруткой при

пропускании тока (рис. 11.6). Величина переходного сопротивления не должна превышать 2–3 мОм. Испытания на токовые перегрузки проводят с целью определения изменения переходного сопротивления соединений.

$$R_{\text{пер}} = \frac{U}{I} - R_x - R_y. \quad (11.1)$$

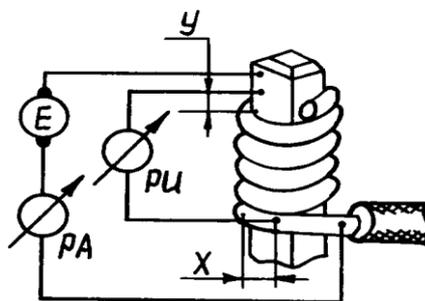


Рис. 11.6. Схема измерения переходного сопротивления

Соединение накруткой, 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.

К механическим воздействиям относятся испытания на вибрацию и на усилие стягивания. Соединение накруткой должно выдерживать не менее 12,5 часов при воздействии вибрации, модифицированное соединение - 24 часа, в то время как паяное - 8. Усилие стягивания - это усилие, требуемое для снятия полного соединения вдоль оси вывода при постоянно увеличении со скоростью 10 Н в минуту. Оно зависит от сечения провода, усилия натяжения провода при накрутке и пропорционально числу витков в накрутке.

Сегодня накрутка широко используется для реализации переменной части монтажа на унифицированных платах, когда нужно создавать модификации изделий за счет добавления новых связей. Доля соединений, добавляемых накруткой, в этом случае не превышает 10%. Соединения накруткой хорошо сочетаются с технологией впрессовыванием штырей в отверстия. Тогда монтаж обходится без процессов пайки или сварки. Крупные коммутационные блоки и стойки аппаратуры связи монтируются именно таким образом.

11.2. Зажимное соединение сжатием

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 заземлением провода 1 на штыре 2 специальной клипсой – зажимом 3 (рис. 11.7). Пружинные захваты зажима прижимают провод к штырю с силой около 200 МПа. Поэтому соединение, имеющее относительно небольшую поверхность контактирования, газонепроницаемо и механически устойчиво [3].

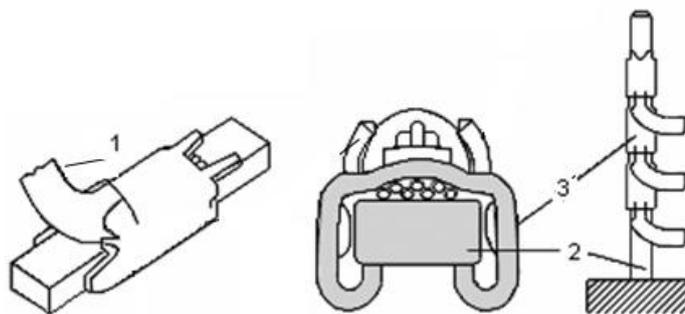


Рис. 11.7. Соединение сжатием типа «Termipoint»

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 разместилось три соединения.

Материал провода – медь, покрытая серебром, оловом или кадмием. Провод должен обладать достаточной прочностью, чтобы не разрушиться от давления при жима к штырю. Для соединений «термипойнт» используют многопроволочные провода, так как для одножильных проводов используют метод накрутки. Концы провода необходимо освободить от изоляции на длине 3–4 мм.

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

11.3. Соединения обжатием

С помощью этого постоянного соединения обычно соединяют провода с всевозможными наконечниками (рис. 11.8). В силовой электронной аппаратуре и в автомобильной бортовой сети этот метод применяется уже давно. В электронной аппаратуре его применяют в основном в цепях питания, заземления, сетево-

го 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. 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.

Провод 1 помещают в хвостовую часть соединительного элемента 2, имеющего форму втулки, и обжимают (рис. 11.9,а).

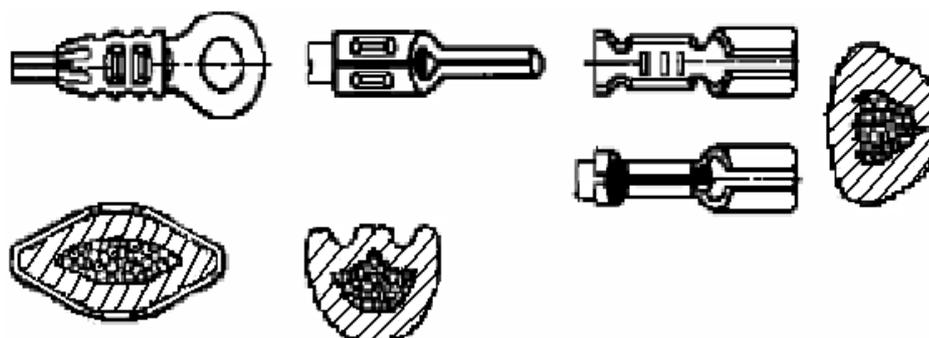


Рис. 11.8. Соединения обжатием проводов в наконечниках

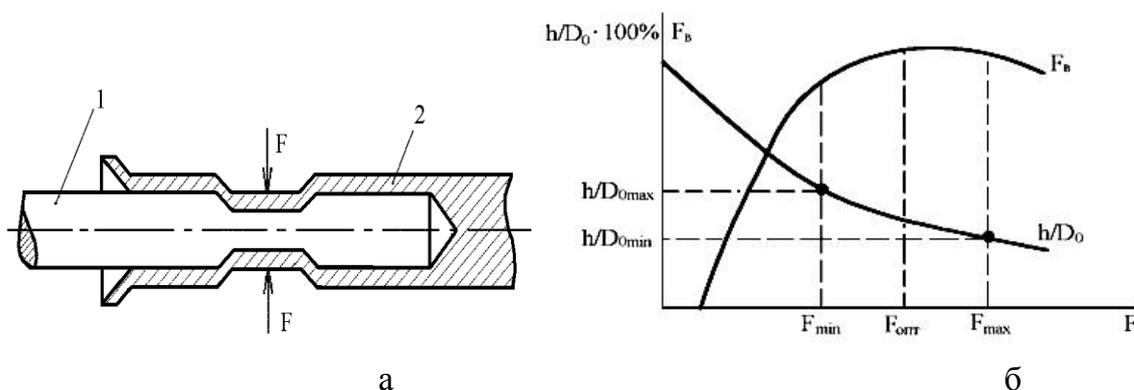


Рис. 11.9. Соединение обжатием (а) и диаграмма деформаций (б)

Благодаря высокому удельному давлению соединяемые металлы подвергаются значительной пластической деформации, и вследствие холодной текучести контактирующих поверхностей между ними возникает интенсивный молекулярный контакт. После пластической деформации под действием остаточной упругой деформации соединяемые поверхности сжимаются с определенной силой. Такое соединение обладает высокой проводимостью, газонепроницаемостью, теплостойкостью и вибростойкостью.

Переходное сопротивление и прочность на растяжение соединения зависят от величины деформации, которая определяется размерами соединяемых элемен-

тов. Механическая прочность соединения характеризуется силой $F_в$, необходимой для вытягивания провода при разрушении соединения, которая зависит от силы сжатия F (рис. 11.9,б). С увеличением силы сжатия, а также по мере снижения отношения h/D_0 (где h — размер деформации; D_0 — начальный диаметр элемента) сила вытягивания растет до определенного значения.

11.4. Эластичное соединение

Это разъёмное соединение с нулевым усилием сочленения осуществляется через «островки» эластичного проводящего полимера (резины). Главный его недостаток — большое электрическое сопротивление (10–100 Ом). Но ряд устройств и не требует малоомных соединений: дисплеи (например, в электронных часах), сенсорные панели, контакты с электростатическими стоками и т.п. Применяют эластичные контактные элементы, выполненные в виде шариков (рис. 11.10) или вырезанные из многослойных пластин чередующихся слоев саженнаполненной и непроводящей резины (зебра). Эластичные контакты особенно хороши, когда нет гарантий ровности рельефа контактирующих поверхностей, своей эластичностью они компенсируют эти неровности.

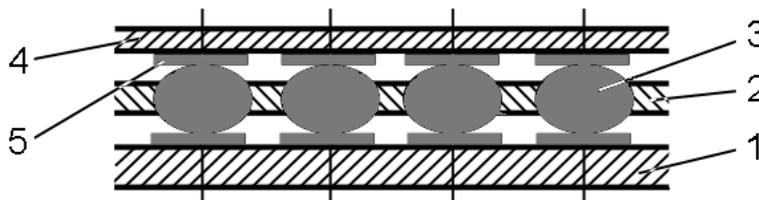


Рис. 11.10. Соединения через токопроводящую резину: 1 — монтажная подложка; 2 — держатель токопроводящих элементов; 3 — токопроводящие резиновые элементы; 4 — компонент; 5 — контактное поле компонента

11.5. Соединения врезанием

Этот вид соединений применяют для плоских многопроводных кабелей (рис. 11.11), когда к ним нужно присоединить разъем. Ножи этого разъема при продвижении их на кабель прорезают изоляцию проводов плоского кабеля и фиксируются на жилах проводов. Естественно, что шаг ножей разъема должен совпадать с шагом проводов плоского кабеля.

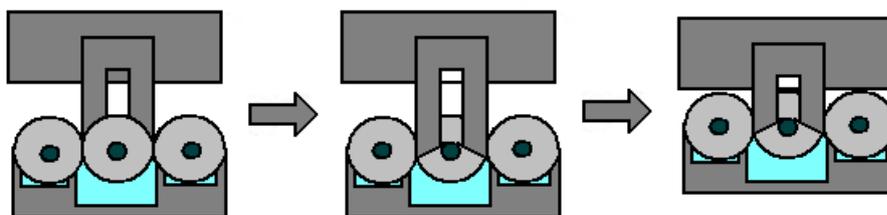


Рис. 11.11. Соединения врезанием разъемов на плоские кабели

11.6. Соединения типа Press-Fit

Появление конструкций многослойных печатных плат в виде объединительных панелей с мощными цепями земли и питания, выполненных отдельными металлоемкими слоями, создало большие проблемы для технологов при их монтаже. Массивные слои земли и питания являются мощными теплоотводами при пайке и припой, поднимаясь до этих слоев, остывает, и отверстия оказываются непропаянными. Перегрев панели приводит к разбрызгиванию припоя и создает проблемы, связанные с термоустойчивостью материалов плат и пайки. Кроме того, что хвостовики разъемов при пайке необходимо защищать от припоя для обеспечения накрутки, что требовало дополнительных операций нанесения защитных покрытий и последующего их удаления. Большая длина хвостовиков заставляло поднимать волну, и в этой ситуации трудно обеспечить ее равномерность.

Паяные соединения были заменены непаяными, когда научились на контактном штыре выполнять специальную пуклевку, создающую упругую деформацию при впрессовывании штыря 1 в металлизированное отверстие 2 платы 3 (рис. 11.12,а). Упругая деформация пуклевки компенсировала релаксацию материалов и погрешности размеров отверстий плат. Формы таких пуклевок разнообразны (рис. 11.12, б), но все они имеют широкую зону упругой деформации и поверхность сопряжения, достаточную для электрического и механического контакта штыря с отверстием.

Соединения этого типа получили название «Press-Fit», буквально означает «прессовое соединение», а более точно: «соединение, выполняемое впрессовыванием пуклевки контактного штыря в металлизированное отверстие» [3]. Достоинства этого вида соединений:

- высокая механическая прочность на растяжение;
- высокая устойчивость к вибрационным нагрузкам и надежность;
- отсутствие необходимости в нагреве для образования соединения;
- коррозионная стойкость за счет герметичности контакта;
- экономичность и ремонтпригодность;
- экологическая чистота производства (из-за отсутствия флюсов и припоев).

Запрессовываемый контактный штырь состоит из части для сочленения с ответным соединителем, запрессовываемой части – пуклевки, заходной части и части, предназначенной для монтажа накруткой или для сочленения с другим соединителем (рис. 11.13). 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. Если контакт имеет форму лиры, то усилие запрессовки прилагается на дно лиры как на самый удоб-

ный 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.

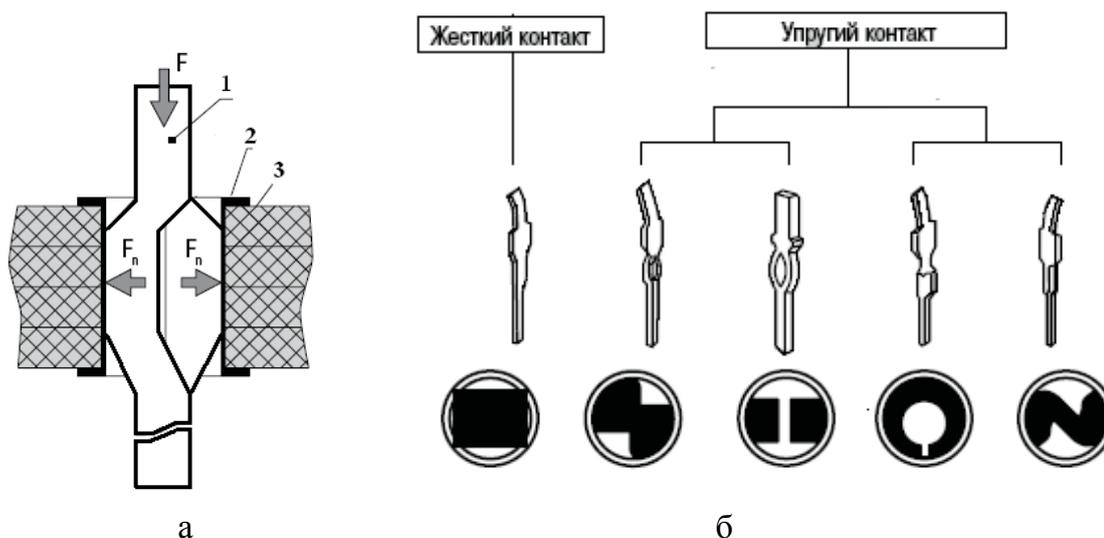


Рис. 11.12. Схема соединения (а) и виды соединений (б) типа Press Fit

Запрессовываемая часть контакта выполняет основную роль в образовании соединения – это 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 в плате, а длина запрессовываемой части контакта должна соответствовать толщине печатной платы, в которую он устанавливается.

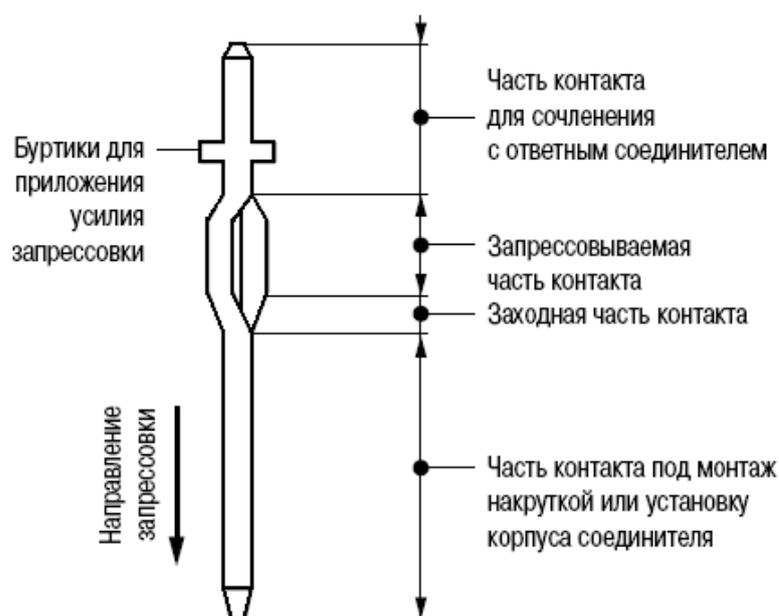


Рис. 11.13. Элементы конструкции контактного штыря

Заходная часть контакта играет существенную роль при запрессовке. Ее форма позволяет ориентировать контакт надлежащим образом при его входе в отверстие и обеспечивать плавное обжатие пуклевки штыря металлизированным отверстием. Жесткость пуклевки должна быть ограничена, иначе внедрение контакта может разрезать металлизацию отверстия.

Сквозные металлизированные отверстия 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. Оловянно-свинцовое покрытие, которое при запрессовке выполняет роль «смазочного» материала не должно быть слишком толстым, так как в этом случае его частицы будут выдавливаться из отверстия запрессовываемым контактом и становиться источником замыкания.

Технология запрессовки требовательна к конечному диаметру металлизированного отверстия в печатной плате в большей мере, чем для процессов пайки. Необходимо соблюдать определенные допуски на всю структуру отверстия. Это касается и диаметра отверстия после сверления, толщины медного покрытия и толщины оловянно-свинцового покрытия – 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. Запрессовка контакта начинается с подачи на его опорные поверхности усилия запрессовки, под воздействием которого предварительно установленный контакт начинает входить в сквозное металлизированное отверстие 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 результате 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. 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.

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 (рис. 11.14).

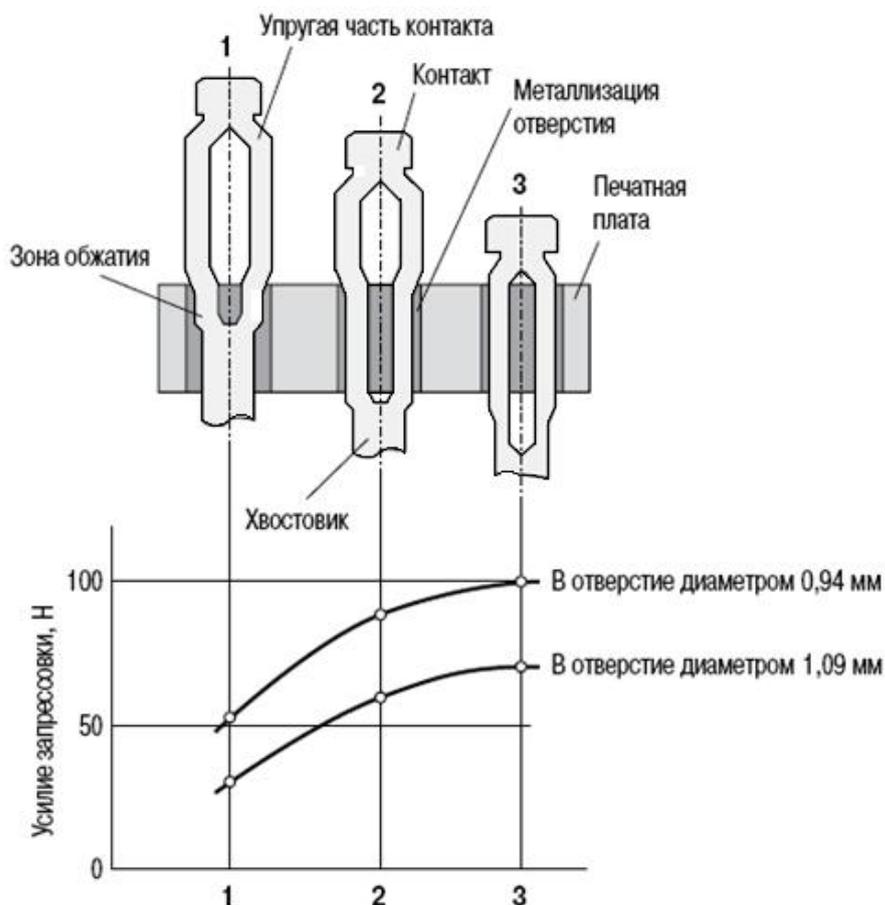


Рис. 11.14. Возрастание усилия запрессовки штыря при внедрении его в отверстие

Для выбора оборудования по технологии Press-Fit необходимо учитывать, что усилие запрессовки разъема со 160 контактами составляет 3,2 т. Основными компонентами комплекта для запрессовки многоштыревых соединителей являются пуансон, передающий давление со штока прессы на соответствующие опорные поверхности контакта, и подплатная матрица, обеспечивающая дополнительную жесткость платы (рис. 11.15), чтобы она не прогибалась под воздействием усилия запрессовки.

Рекомендуется выполнять запрессовку соединителей на платы после установки и пайки компонентов. При пайке после запрессовки разъемов платы нагреваются до температур, больших, чем температура стеклования связующего материала платы, и прессовое соединение ослабляется.

Несмотря на высокую степень освоения технологии запрессовки, еще существует ряд проблем, которые до сих пор не решены. Например, неясно какие именно элементы конструкции платы принимают на себя напряженное состояние запрессованного контакта. Слой металлизации в отверстии имеет толщину всего 25 мкм, а доля упругости меди составляет всего 0,5% от общей деформа-

ции. Другим элементом тугой посадки может быть стенка отверстия в стекло-эпоксидной композиции материала платы. Все это очень важно для назначения требований к геометрии отверстия: до или после металлизации.

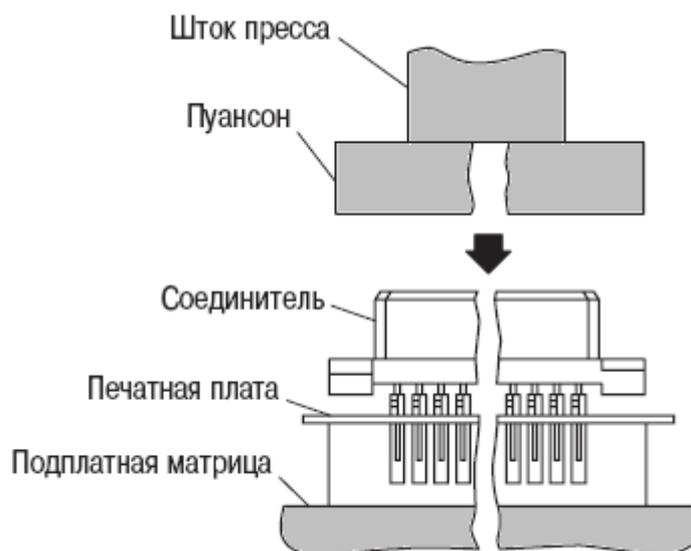


Рис. 11.15. Оснастка для запрессовки контактов разъемов в платы

Техника Press-Fit все еще требует исследований:

- напряженного состояния компонентов соединения 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 соединений в экстремальных условиях эксплуатации, что особенно важно для установления целесообразности применения технологии Press-Fit в изделиях ответственного назначения.

Список литературы к главе 11

1. Фролих Я. Непаяные соединения в электронике. – М.: Энергия, 1978.–192 с.
2. Ковалев С., Ковалев В. Основные расчетные параметры электромонтажа методом накрутки // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – № 8. – С. 43–47.
3. Медведев А.М. Сборка и монтаж электронных устройств.– М.: Техносфера, 2007. – 256 с.

ГЛАВА 12

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ

12.1. Методы контроля качества соединений

Контроль качества предусматривает следующие способы оценки паяных соединений: по внешнему виду при 100%-ном контроле, по переходному сопротивлению контакта выборочно для различных проводников, по прочности на отрыв при выборочном контроле на образцах–свидетелях, анализ структуры припоя и характера диффузионной зоны выборочно для образцов-свидетелей, по надежности путем определения интенсивности отказов в течение заданного срока испытаний. Качество паяных соединений по внешнему виду проверяется при помощи бинокулярного микроскопа типа МБС–9 с кратностью увеличения $\times 56$. Соединения с гладкой блестящей поверхностью без трещин и следов перегрева, с полностью заполненным зазором между паяемыми деталями (при угле смачивания $5\text{--}10^\circ$) считаются высококачественными. Одновременно отмечаются такие дефекты, как холодный непрогретый спай, избыток или недостаток припоя, короткозамыкающее паяное соединение.

Для повышения объективности визуального контроля и удобства в работе используют стереомикроскопы Mantis фирмы Macro Vision Engineering с хорошими эргономическими показателями, увеличением в 2,5–5,0 раз, освещением рабочего поля 9500 люкс, возможностью безокулярного наблюдения или рабочие места визуального контроля VS8 (рис. 12.1).

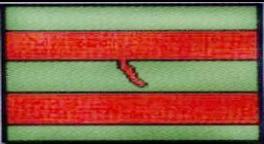
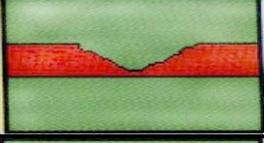
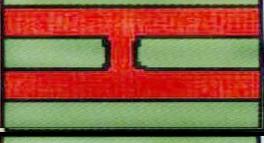
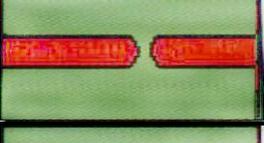
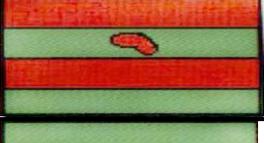
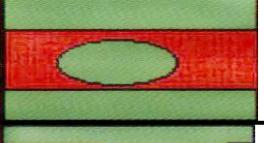
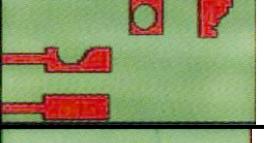
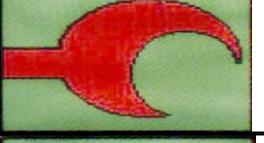
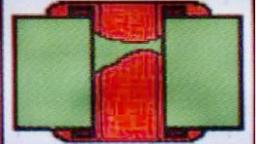


Рис. 12.1. Стереомикроскоп Mantis Macro (а) и рабочее место VS8 (б)

Недостатками визуального контроля являются: ограниченные возможности зрения, человеческий фактор, невозможность выявления скрытых дефектов.

При автоматической оптической инспекции могут быть выявлены также следующие дефекты, которые в сравнении с возможностями электрического контроля (ЭК), приведены в табл. 12.1.

Таблица 12.1. Виды дефектов и возможности их диагностики

Тип дефекта	Возможность диагностики средствами		Примеры дефектов
	ЭК	АОИ	
Почти перемычка	нет	да	
Почти обрыв	нет	да	
Перемычка	да	да	
Обрыв	да	да	
Критичное включение	нет	да	
Перетрав проводника	нет	да	
Повреждение печатного проводника	нет	да	
Повреждение контактных площадок	нет	да	
Несовмещение отверстия с контактной площадкой	нет	да	
Забитое отверстие	нет	да	
Обрыв металлизации в отверстии	да	нет	

Для автоматической оптической инспекции технологических дефектов сборки электронных модулей с высокой плотностью монтажа применяют систему визуального контроля VT9500С, которая позволяет контролировать точность установки компонентов с минимальным размером 0402, шагом между выводами компонента 0,4 мм и производительностью до 13 см²/с. Одновременно контролируется реальное количество припоя и форма галтели для каждого паяного соединения. Для контроля качества соединений компонентов BGA, μBGA, CSP, Flip Chip, выводы которых не видны, используют автоматические системы комбинированного контроля. Эти системы сочетают в себе автоматический оптический и рентгеновский контроль, что позволяет распознавать как все визуальные, так и все невидимые дефекты, скрытые под корпусами компонентов. Такое сочетание позволяет осуществлять одновременный контроль SMD и выводных компонентов, а также инспектировать качество нанесения паяльной пасты и соединений в закрытых для визуального контроля областях.

Комбинированная система контроля X7055 компании VISCOM отличается высокой скоростью контроля установки компонентов с шагом 0,3 мм и рентгеновского контроля скрытых дефектов соединений. Система оснащена ортогональными 4-мегапиксельными камерами с линейным разрешением 10 мкм и угловым разрешением 22 мкм. Рентгеновский модуль оснащен микрофокусной рентгеновской трубкой с напряжением 120 или 160 кВ и точностью распознавания менее 2 мкм. Для увеличения пропускной способности возможен вариант оснащения системы двойным конвейером с размером платы до 200x280 мм. Системам X7055 может быть интегрирована в технологическую линию поверхностного монтажа, а при помощи специального программного обеспечения можно оптимизировать производственный процесс на компьютере.

Одним из перспективных методов объективного контроля паяных соединений является оценка их температурного перепада. В данном методе контролируемую плату подключают к источнику питания и генератору импульсов фиксированной частоты. После установления теплового равновесия плату со стороны паек сканируют инфракрасным датчиком тепловизора. Тепловизор позволяет воспроизводить перепады температур на поверхности исследуемого изделия, используя естественное инфракрасное излучение. Таким образом, обнаруживаются зоны локальных перегревов, соответствующие дефектным паяным соединениям, которые имеют температуру на 1–5°С выше номинальной. В качестве датчиков используют фотоболометры и другие инфракрасные детекторы. Тепловизионная система Thermovision 880 фирмы AGEMA (Швеция) имеет разрешение 0,1°С в диапазоне температур от –20 до 1500°С. В состав системы входит ИК сканер с временной разверткой 25 кадров/с, ЭВМ и дисплей.

Повышение качества контроля паяных соединений достигается путем применения лазерной системы контроля дефектов (рис. 12.3) [1]. С помощью гелий-неонового лазера устанавливают точное местоположение контролируемого элемента 3 в системе X–Y координат передвижного столика 4.



Рис. 12.2. Тепловизионная система Thermovision 880

Контрольные лучи излучает мощный неодимовый лазер, работающий в инфракрасной области с длительностью излучения, которую задает микропроцессор, связанный с затвором 1. Луч, управляемый зеркалом 2, падает на место пайки на контрольном элементе, причем большая часть света отражается от блестящей и однородной поверхности пайки. Если структура пайки зернистая, то она начинает поглощать энергию луча, нагревается и посылает инфракрасное вторичное излучение. Собранное в линзах 5 и отраженное зеркалом излучение воспринимается инфракрасным датчиком 6, сигнал с которого анализируется с помощью микропроцессора и подается на осциллограф в виде термограммы. Лазерным контролем обнаруживаются такие дефекты соединения, как раковины, внутренние включения, поскольку они имеют меньшую массу и нагреваются по этой причине быстрее, чем сплошные паяные соединения. Разогревание паяного соединения с помощью неодимового лазера выходной мощностью 60 Вт происходит за 50 мс. В итоге удастся контролировать в секунду около десяти соединений, расположенных на расстоянии 1,25 мм друг от друга. Автоматизированный контроль соединений с помощью лазерной системы позволяет значительно увеличить производительность контроля, для чего микропроцессору задается программа расположения паяных соединений на плате.

Мощность поверхностного источника тепла зависит от мощности потока лазерного излучения, а также от эффективности его поглощения поверхностью, на что оказывает влияние состояние поверхности соединений. Загрязненная, либо окисленная, либо имеющая внешние дефекты поверхность поглощает излучение сильнее, чем нормальная, имеющая выраженный зеркальный блеск.

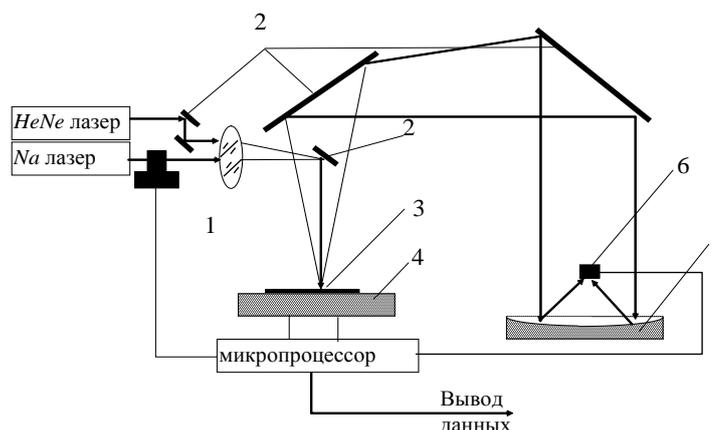


Рис. 12.3. Схема лазерной системы контроля паяных соединений

В результате соединения с поверхностными дефектами нагреваются интенсивнее, что отражается на величине температуры насыщения, пропорциональной коэффициентам поглощения. С помощью лазерного контроля обнаруживаются такие дефектные соединения, как раковины, внутренние включения, поскольку они имеют меньшую массу и нагреваются по этой причине быстрее, чем сплошные паяные соединения (рис. 12.4).

На релаксационные процессы внутри соединений оказывает влияние количество припоя и его распределение, наличие или отсутствие внутренних неоднородностей, связанных с неполным ее оплавлением или сформированных при механических воздействиях во время кристаллизации, а также внутренних включений или раковин.

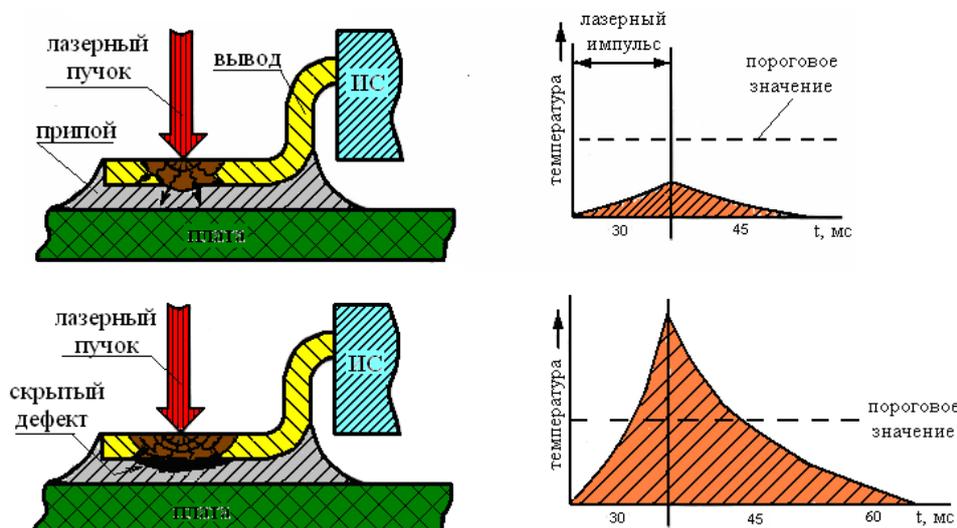


Рис. 12.4. Схемы лазерного контроля и термограммы паяных соединений

На качество теплового контакта соединения с подводящими проводниками оказывают влияние изменение сечения контакта, вызванное смещением в ходе пайки вывода элемента относительно контактной площадки или дефектностью формовки вывода, плохими условиями смачивания вследствие неоптимального температурного режима пайки и нарушения сплошности контакта, вызванные

механическими смещениями в процессе кристаллизации. Поэтому параметр времени релаксации температур в соединении дает ценную информацию о внутренней структуре и о качестве контакта с подводщими проводниками.

12.2. Контроль электрических параметров соединений

Переходное сопротивление паяного соединения измеряется методом разности потенциалов между двумя точками, расположенными на расстояниях X и $У$ от границы раздела соединяемых металлов (рис. 12.5,а). Величина переходного сопротивления R_n определяется как:

$$R_n = U/I - 2R_x, \quad (12.1)$$

где U – величина измеренного напряжения; I – ток, протекающий через соединение; R_x – сопротивление участка X .

Измерения проводят на постоянном токе, так как на переменном возникает поверхностный эффект, искажающий значения измерений. Величина переходного сопротивления надежного паяного соединения находится в пределах $(2-3) \cdot 10^{-3}$ Ом. Для измерения переходного сопротивления соединений при помощи универсального вольтметра В7-46 с микропроцессорным управлением собирают 4-х проводную схему (12.5,б) и проводят математическую статистическую обработку результатов измерений после соответствующего программирования. Перед измерениями вольтметр программируют и проводят 10 измерений искомой величины с индикацией среднего значения, что позволяет получить достоверные результаты.

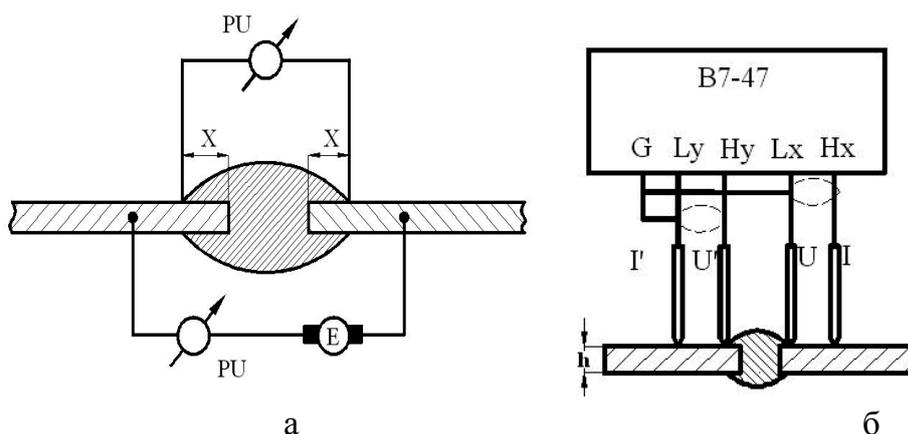


Рис. 12.5. Схемы измерения переходного сопротивления методом разности потенциалов (а) и универсальным вольтметром (б)

Переходное сопротивление определяется, как

$$R_{пер} = R_{изм} - R_{сх}, \quad (12.2)$$

где $R_{изм}$ – измеренное значение сопротивления, $R_{сх}$ – сопротивление схемы измерений.

Погрешность измерений определяется типом структуры, толщиной δ и составляет до 5%. Для уменьшения погрешности измерения проводят при температуре окружающей среды $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(65\pm 15)\%$, расстоянии между зондами значительно превышающими диаметр точечного контакта зонда и более чем в 2 раза толщину припоя.

При автоматическом электрическом контроле соединений используют системы электрического контроля с летающими пробниками SPEA 4040, которые осуществляют подачу питания и прием сигнала от контролируемого соединения на плате или компонента с автоматической проверкой работоспособности. Современные технологии электрического контроля позволяют обойтись без специальных контактных площадок. Так, для SPEA 4040 достаточно использовать площадки с шагом 100 мкм. В крупносерийном производстве для сокращения времени контроля применяют специализированные адаптеры типа «ложе гвоздей», и тогда контактные площадки необходимо разнести на шаг 2,54 мм. Производительность контроля системы SPEA 4040 составляет от 20 до 50 тестов/с в зависимости от количества летающих пробников (рис. 12.6). Система обеспечивает функциональный контроль электронных сборок в большом диапазоне программируемых токов (5–30 А), напряжений (0–100) и сопротивлений (0,001 Ом–100 МОм).



Рис. 12.6. Система летающих пробников для электрического контроля соединений

12.3. Контроль физико-механических свойств соединений

Критериями оценки прочности паяных соединений являются величина усилия отрыва, устойчивость соединений при воздействии знакопеременных нагрузок и вибропрочность. Испытания с разрушением паяных соединений применяются для определения их механических и физико-механических свойств. Механические испытания различаются по способу нагружения и характеру его изменения во времени. Для паяных соединений наибольшее распространение получили испытания на срез и на отрыв. Испытания паяных образцов на срез с приложением растягивающей нагрузки проводят на плоских и круглых образцах, спаянных внахлестку. Программой испытаний паяных соединений, признанной

на международном уровне, является стандарт IEC-PAS 62137-3 [2].

Прочность на отрыв для паяного соединения медных проводников припоем ПОС61 при оптимальных режимах не менее 30 МПа обеспечивается при ширине диффузионной зоны 0,8–1,2 мкм (рис. 12.7).

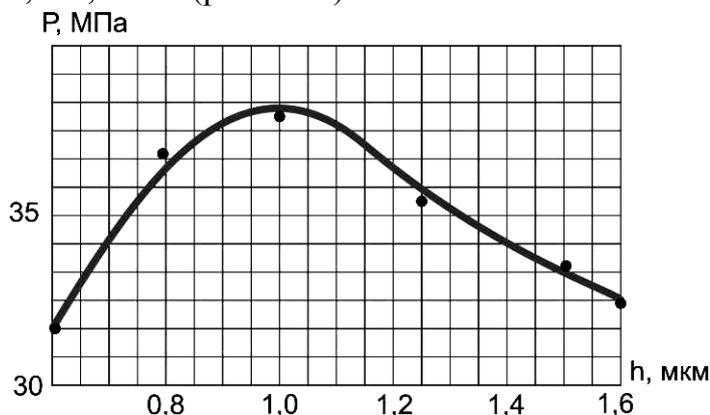


Рис. 12.7. Зависимость предела прочности паяного соединения от ширины диффузионной зоны

Устойчивость паяных соединений при воздействии знакопеременных нагрузок оценивают по среднему числу циклов закручивания на угол $\varphi = \pm 0,75$ град/мм и среднему числу циклов изгиба вывода l на угол $\alpha = \pm 10^\circ$ относительно платы 2 с частотой 50–100 циклов в минуту и одновременным воздействием осевой нагрузки P , равной 0,1–0,5 величины усилия статического разрыва припоя 3 (рис. 12.8). Вибропрочность оценивают по времени, в течение которого паяные соединения противостоят разрушению под действием вибрации с частотой 50–2000 Гц и ускорением, соответствующим максимальным ускорениям при нормальной эксплуатации аппаратуры.

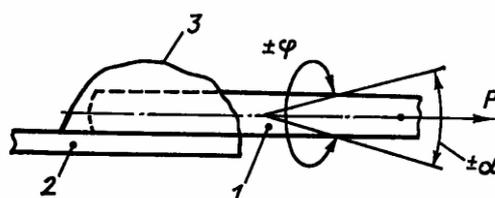


Рис. 12.8. Схема приложения знакопеременных нагрузок при испытании паяного соединения

Для многовыводных компонентов, закрепленных на платах методом пайки, проводят испытания прочности соединений кручением. Для этого на тестовой установке плату с компонентами закрепляют крепежными болтами с четырех сторон, а зажим (фиксатор) устанавливают строго перпендикулярно плате так, чтобы он накрывал по поверхности платы (рис. 12.9). Фиксатор медленно вращают со скоростью от 0,00698 до 0,01175 рад/с (0,4–1,0 °/с). Во время скручивания компонента момент вращения передается плате, которая при надежной фиксации не должна гнуться.

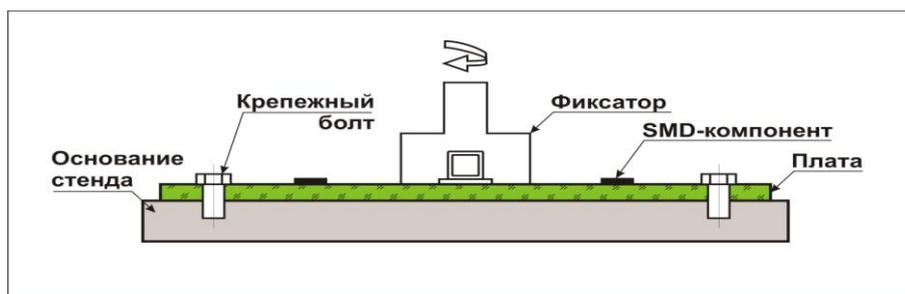


Рис. 12.9. Схема испытаний прочности монтажа компонентов кручением

Для SMD, установленных на печатной плате, проводят испытания прочности паяных соединений монотонным изгибом платы с помощью индентора (рис. 12.10). Давление на индентор выбирают исходя из максимального изгиба платы 20 мм, радиус индентора должен быть $5 \pm 0,2$ мм, радиусы опорных фиксаторов – $2,5 \pm 0,2$ мм, расстояние между опорами – 90 ± 1 мм.

Скорость смещения индентора устанавливают в пределах 0,5–6,0 мм/мин. Паяное соединение считается поврежденным, если произошел обрыв электрической цепи.

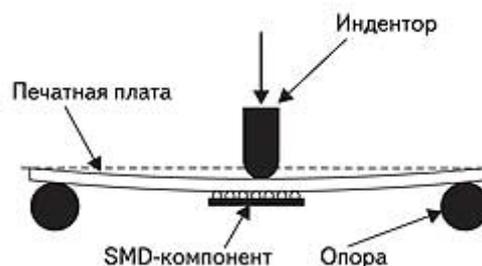


Рис. 12.10. Схема испытаний паяных соединений SMD монотонным изгибом

Прочность сцепления – одна из важнейших характеристик металлического покрытия, наносимого под воздействием УЗ колебаний на неметаллический материал. Оценивается она методом нормального отрыва испытательного приспособления, припаянного легкоплавким припоем к металлическому покрытию. Существующие методики используют различные виды испытательных приспособлений: проволочный крючок диаметром 0,8–1,0 мм, металлический стержень диаметром 3–5 мм или диск площадью 6 мм^2 . При пайке площадь растекания припоя ограничивается трафаретом, имеющим диаметр на 1–2 мм больший диаметра диска.

Перпендикулярность оси диска по отношению к металлическому покрытию обеспечивают с помощью специального приспособления, фиксирующего положение стержня в момент пайки. Температуру паяльника поддерживают на заданном уровне посредством автоматических регуляторов. Эти меры позволяют в значительной степени уменьшить разброс экспериментальных данных.

Для испытаний на прочность сцепления используют различные типы раз-

рывных машин, например РМИ-250, РМ-50 и др. Лучшие результаты могут быть получены на машинах с регулируемым усилием нагружения, поскольку неметаллические материалы в большинстве своем хрупки и чувствительны к воздействию ударных нагрузок.

Для определения прочности паяных соединений со стеклокерамическими материалами разработана методика плавного нагружения и отрыва испытательного приспособления. С целью исключения термотрещин и ослабления механической прочности образцы предварительно подогреваются до величины не менее 0,5–0,7 температуры плавления припоя. Отрыв испытательного приспособления осуществляется нормально к поверхности образца на разрывной машине РП 100-1 при скорости движения нижнего захвата $0,6 \pm 0,03$ м/мин. Прочность соединения оценивается по величине усилия отрыва, определяемого по шкале разрывной машины с точностью $\pm 0,5$ Н, отнесенного к площади отрыва, подсчитанного под микроскопом МБС-9. Для повышения точности измерений усилия отрыва нагружение образцов осуществляют в два этапа: предварительное со скоростью 1,5–2,0 кН/мин до усилия 100 Н и основное со скоростью 8,8 кН/мин. Для предварительного нагружения применяют специальное устройство с тарированной пружиной. Устройство (рис. 12.11) в виде стакана 1 с помощью крючков соединяется с верхним захватом разрывной машины и с испытательным приспособлением 4, припаянным к образцу 5.

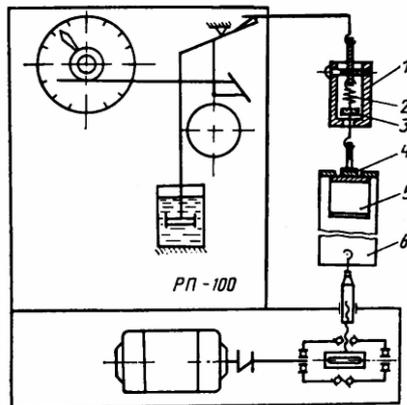


Рис. 12.11. Схема испытаний на прочность сцепления с неметаллическими материалами

При движении нижнего захвата 6 разрывной машины пружина 2 растягивается до момента жесткого контакта ограничительного элемента 3 со стенкой приспособления. Плавный режим нагружения хрупких неметаллических материалов исключает влияние ударных воздействий и повышает тем самым точность показаний.

12.4. Металлографический контроль качества соединений

Для оценки структуры припоя приготавливают металлографические шлифы, которые исследуют с помощью оптических микроскопов МИМ–7, ММР–2Р и др. При этом обращают внимание на то, что надежному паяному соединению соответствует мелкозернистая плотная структура припоя, что свидетельствует об оптимальных режимах процесса пайки и охлаждения. Путем химического травления микрошлифов паяных соединений выявляют диффузионную зону между припоем и основным металлом, в зависимости от ширины которой судят о качестве паяного соединения. При перегреве происходит глубокая взаимная диффузия основного металла и припоя, частичное растворение (эрозия) металла в припое, что приводит к образованию в нем интерметаллидов, снижающих прочность соединения. При недогреве глубина диффузии чрезвычайно мала, прочность чисто адгезионного спая недостаточна для обеспечения требуемой надежности контактного соединения.

Для получения оцифрованных изображений микрообъектов и выполнения измерений по трем координатам используют цифровой видео микроскоп HIROX КН-7700 (рис. 12.12), который объединяет новейшие прогрессивные достижения нескольких областей современных технологий. Он позволяет осуществлять анализ трехмерных объектов в реальном масштабе времени с шагом до 0,25 мкм и цифровой записью результатов с разрешением до 58 Мегапикселей.



Рис. 12.12. Цифровой видеомикроскоп КН-7700

Для исследования поверхности соединений без их разрушений используют электронный растровый микроскоп. Варьируя энергию электронов луча и изделия, а тем самым и глубину их проникновения, определяют пространственный рельеф и качество паяного соединения. Растровая электронная микроскопия (РЭМ) характеризуется по сравнению с оптической микроскопией более высокими значениями пространственного разрешения и глубины резкости, а также возможностью одновременного проведения химического атомарного анализа на

основе регистрации спектра характеристического рентгеновского излучения, генерируемого при облучении поверхности образца электронным лучом. Пространственное разрешение при оптимальных условиях порядка 10 нм, а глубины резкости находятся в пределах 2-4 мкм при увеличении $\times 10000$ и 0,2-0,4 мм при $\times 100$.

Для оценки качества соединений, определения глубины поверхностных дефектов в соединениях, толщины нанесенных покрытий и пленок может быть использован профилометр оптический интерферометрический (ПОИ-08), который представляет собой программно-аппаратный комплекс, реализованный на базе микроинтерферометра МИИ-4, оснащенный цифровой программной системой регистрации и обработки информации. Прибор имеет вертикальное разрешение – 10 нм, максимальная высота измерения – 5 мкм, максимальное поле зрения – $0,32 \times 0,32$ мм и оптическое увеличение – 120 крат.

Исследования структуры паяного соединения с локальным рентгеноспектральным анализом элементного состава могут быть выполнены на растровом электронном микроскопе Stereoscan-360 (Cambridge Instruments, Англия) с энергетическим спектрометром AN-10000 (Link, Англия) при ускоряющем напряжении (0,2–40) кВ и диапазоне увеличений от $\times 10$ до $\times 100000$ в режиме отраженных и вторичных электронов с фоторегистрацией результатов и получением псевдоцветного изображения (рис. 12.13).



Рис. 12.13. Растровый электронный микроскоп Stereoscan-360

Для исследований необходимы образцы размером 15,0x15,0x1,0 мм. Диапазон контролируемых размеров от 0,5 мкм до 10 мм. Рентгеноспектральный анализ элементного состава выполняется локально в точках диаметром 1 мкм при чувствительности до 0,5–1,0% атомов и диапазоне элементов от В до U.

12.5. Типичные дефекты паяных соединений

12.5.1. «Холодная» пайка

Это самый распространенный дефект пайки, который наиболее часто досажает пользователям аппаратуры из-за неустойчивого контакта. При тестировании соединений в производстве этот дефект плохо распознается (за исключением ИК контроля). Впоследствии диффузия влаги и кислорода воздуха окисляет соприкасающиеся поверхности, что создает эффект неустойчивого контакта. Кроме того, окисленные поверхности не позволяют восстановить качество соединения при ремонте соединения.

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 многообразны:

- недостаточный прогрев паек;
- случайный сдвиг соединяемых элементов во время охлаждения;
- потеря активности флюса из-за перегрева или сильного загрязнения поверхностей;
- окисление порошкообразного припоя в пасте;
- плохая паяемость финишных покрытий;
- загрязнение припоя: при пайке волной – растворенными металлами, при пайке оплавлением – газовыделениями из компонентов или оснований печатных плат.

Для хорошей текучести припоя и смачиваемости рабочая температура пайки должна превышать температуру ликвидуса на 30–50 градусов. Для бессвинцовых припоев, для которых характерна плохая смачиваемость, приходится поднимать рабочую температуру еще на 20–30 градусов.

Сдвиг соединяемых элементов может возникнуть из-за сильного обдува при охлаждении или из-за толчков конвейера. Если это произойдет в момент перехода температуры от ликвидуса к солидусу, припой необычно быстро затвердевает с образованием крупнокристаллической пористой структуры, проявляющейся как образование матовости. Пористость паяных соединений создает условия окисления и последующего снижения механической прочности.

Перегрев флюса 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.

При длительном хранении припойной пасты окисление поверхности его микроскопических частиц припоя неизбежно. Это одна из причин ограничения срока хранения паяльных паст. Пайка с использованием устаревшим припоем в пасте всегда чревата плохими последствиями, в первую очередь – образованием «холодных» паек.

Финишные покрытия печатных плат сильно сказываются на вероятности образования «холодных» паек. В первую очередь это относится к покрытиям иммерсионным оловом, если не используется барьерный подслоя. Тонкий слой иммерсионного олова быстро (за две недели) прорастает интерметаллидами Sn_xCu_y и теряет паяемость. Наличие барьерного подслоя гарантирует паяемость на несколько лет.

Чревато дефектами и часто используемое покрытие иммерсионным золотом по никелю. Характерный для этого покрытия дефект — черные контактные площадки, появляющиеся на поверхности из-за оголения никеля и выпотевания фосфора, если тонкий слой золота растворяется в припое раньше, чем припой смочит поверхность никеля. Происхождение фосфора в никеле обусловлено особенностями процесса его химического осаждения. Припой скатывается с фосфорированной и окисленной поверхности никеля, из-за чего и проявляется эффект черной контактной площадки. Черные контактные площадки могут возникать также при передержке процесса пайки и при неправильном выборе флюса. Передержка интенсифицирует образование интерметаллидов олова с никелем и олова с фосфором, внедренным в никель. Кроме того, выделение фосфора на поверхности никеля может вызвать и процесс золочения. Осаждение золота из нейтральных электролитов уменьшает вероятность этих явлений.

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

12.5.2. Растворение покрытий

Расплавленный припой активно растворяет покрытия паяемых элементов. В холодном состоянии этот процесс с образованием интерметаллидов идет медленно, а с переходом припоя в расплавленное состояние более интенсивно. Все это имеет следующие отрицательные последствия:

- припой загрязняется примесями, ослабляя прочность соединений;
- 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 интерметаллидов, которые внедряются в паяные соединения, ослабляя их прочность;
- с ростом толщины интерметаллического слоя прочность паяных соединений падает.

На рис. 12.14 показано растворение металлов в припое Sn60/Pb40 [3]. 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. В результате растворения основного металла расплавленным припоем при пайке паяное соединение может быть насыщено 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.

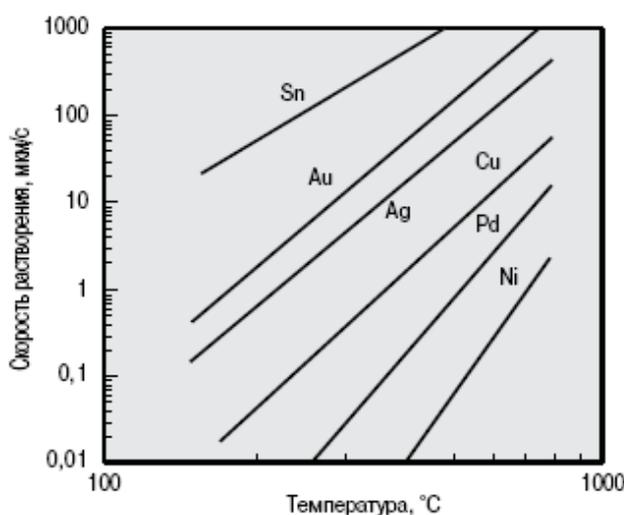


Рис. 12.14. Скорость растворения металлов в припое

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: большой

скоростью растворения припоем; слишком тонкой металлизацией; высокой активностью флюса; высокой температурой пайки; продолжительным временем пребывания при температуре, превышающей температуру ликвидуса припоя, при пайке.

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 интерметаллидов типа Sn_xCu_y . При пайке по покрытию Иммерсионное золото/химический никель 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 припой 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 с, и увеличится почти в 3 раза, когда температура пайки повышается с 205°C до 235°C.

Перечень мер, способствующих уменьшению растворения покрытий, включает в себя: использование финишных покрытий с меньшей скоростью растворения; легирование покрытий элементом с меньшей скоростью растворения; легирование припоя металлом покрытий; использование флюса с меньшей активностью; предотвращение перегрева соединений.

12.5.3. Интерметаллидные 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 (рис. 12.15). 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 (рис. 12.16).

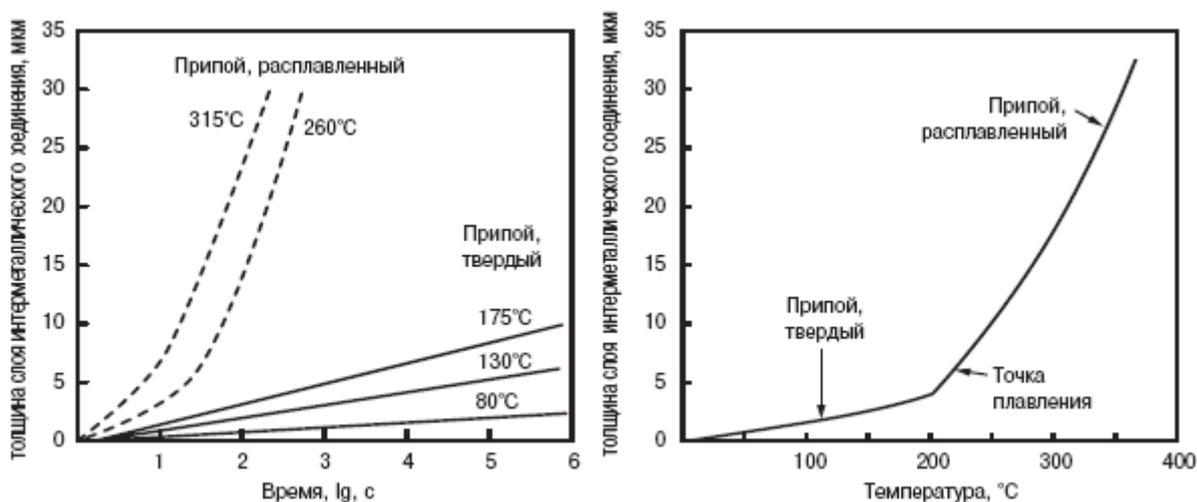


Рис. 12.15. Рост толщины слоя интерметаллидов в припое ПОС61

Интерметаллические соединения также приводят к плохому смачиванию поверхностей припоем. Золото, используемое при металлизации поверхностей для создания паяных соединений в производстве электроники благодаря превосходной стабильности его поверхности и паяемости, при растворении в припое очень пагубно сказывается на пластичности соединений вследствие образования хрупких интерметаллических соединений, в основном AuSn_4 .

Покрытие контактных площадок из чистого золота или его сплава толщиной не более 1,5 мкм может быть полностью растворено расплавленным припо-

ем 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.

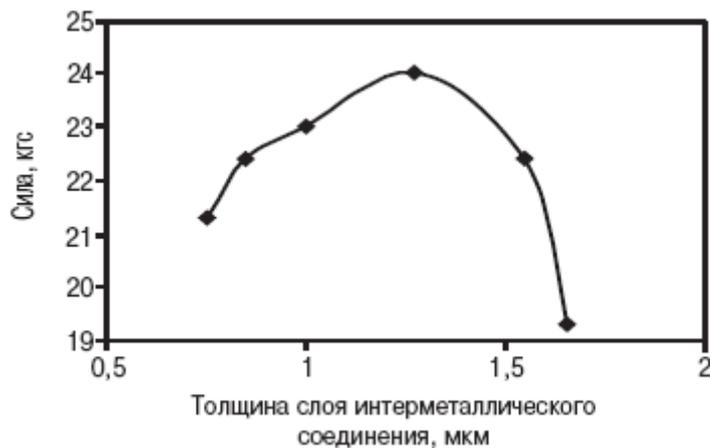


Рис. 12.16 Зависимость прочности паяного соединения на отрыв от толщины слоя интерметаллидов

Альтернатива золотому покрытию – иммерсионное олово с барьерным подслоем избавляет процесс пайки от образования интерметаллических соединений и улучшает процесс пайки.

12.5.4. Отсутствие смачивания

В стандарте международной ассоциации по разработке электронных коммуникаций IPC-A-610D «Критерии приемки электронных сборок» выделяются наиболее характерные дефекты паяных соединений поверхностного монтажа: отсутствие смачивания, эффект «надгробного» камня, шарики припоя, мостики припоя и др.

Отсутствие способности смачиваться припоем проявляется в стягивании припоя в отдельные капли и гребни. Отсутствие смачивания проявляется в отсутствии или недостаточности покрытия припоем контактной площадки или вывода, что связано с большим краевым углом смачивания между припоем и паяемыми поверхностями.

Уменьшение смачивающей способности представляет проблему для качества соединений и подвергает риску их надежность, сокращая размеры галтелей припоя. Причины снижения смачивающей способности поверхностей состоят в плохой и неравномерной их паяемости, ухудшении активности флюса, термодеструкции компонентов, неправильно подобранного термического профиля и среде пайки, выделении в зону пайки газов и паров воды.

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 — все это может способствовать неудовлетворительному смачиванию.

Загрязнения припоя могут привести к неудовлетворительному смачиванию. При окислении больше критического флюс не справляется с функцией раскислителя, он истощается и все это приводит к худшему смачиванию.

Время, температура и среда пайки значительно влияют на смачивание. Недостаточный прогрев паек либо из-за слишком короткого времени, либо из-за слишком низкой температуры приведет к неполному химическому взаимодействию флюса с поверхностью, а также неполному металлургическому смачиванию поверхности. Однако, чрезмерный перегрев при оплавлении припоя не только послужит причиной чрезмерного окисления поверхностей контактных площадок и выводов, но также выжжет больше флюса. Оба явления приведут к неудовлетворительному смачиванию (рис. 12.17). Окисление происходит в среде, содержащей кислород (пайка на воздухе). Использование нейтральной среды азота при пайке приводит к существенному улучшению смачивания.

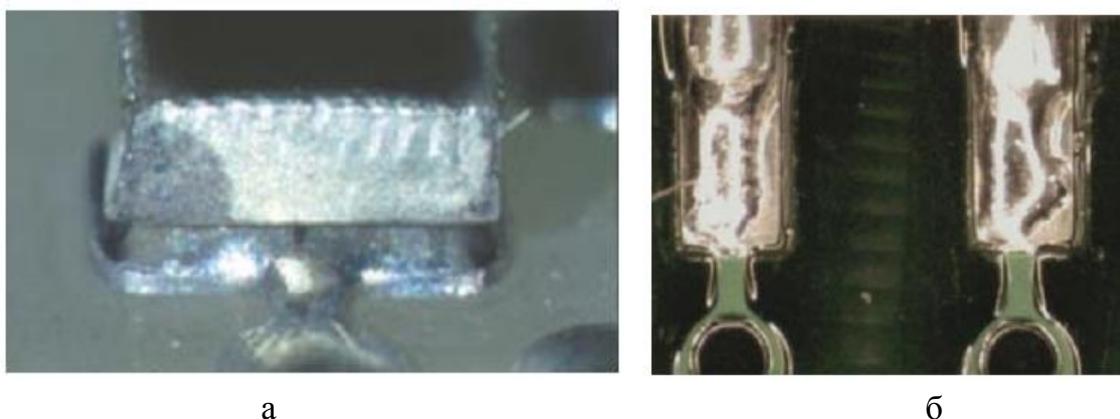


Рис. 12.17. Несмачивание контактной поверхности компонента (а) и контактных площадок платы (б)

Как правило, припой легко смачивает контактные площадки после горячего облуживания, например, при использовании процесса 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 образова-

ние соответствующей галтели припоя может произойти. Меньшее растекание припоя по поверхностям с этими покрытиями, 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, являясь сильным окислителем, приводит к окислению поверхностей расплавленного припоя и межфазных границ раздела, на которых неизбежно образуются интерметаллические соединения. Как только интерметаллическое соединение оказывается незащищенным от внешней среды, оно окисляется и становится несмачиваемым. Уменьшение способности смачиваться зависит от количества выделившегося газа, состава газа и расположения места выделения газа. Чем больше его количество и чем больше водяного пара, тем интенсивнее идут процессы дезактивации поверхностей и уменьшение способности смачиваться.

К гальваническим покрытиям внешних выводов полупроводниковых приборов согласно ГОСТ 20.39.405-84 предъявляются достаточно жесткие требования по паяемости. Выводы и контактные площадки изделий должны иметь гарантированную паяемость с использованием спирто-канифольных не активированных и слабоактивированных флюсов (не более 25% канифоли) без дополнительной подготовки в течение 12 месяцев с момента изготовления. Уменьшение смачивающей способности покрытий представляет проблему для качества паяных соединений и подвергает риску их надежность, сокращая размеры галтелей припоя. Постепенная диффузия меди в оловянное покрытие или припой образует интерметаллические соединения, которые, увеличиваясь на паяемых поверхностях, вызывают отсутствие смачивания.

Результаты испытаний показали, что во многих случаях покрытие олово-висмут не соответствует своему функциональному назначению, т.е. не обеспечивает паяемость внешних выводов. Установлены основные причины брака по паяемости: 10% по причине неполного удаления остатков тонкой пленки облоя и 90% по причине растрескивания как основы, так и покрытия в процессе формовки выводов [4]. Исследования на растровом электронном микроскопе «Stereoscan-360» и микрозондовый рентгеновский анализ на установке AN10000 фирмы «Link» (Англия) выявили многочисленные сетки трещин на формованной части вывода, а также присутствие элементов основы (Fe, Ni) и их окислов (рис. 12.18).

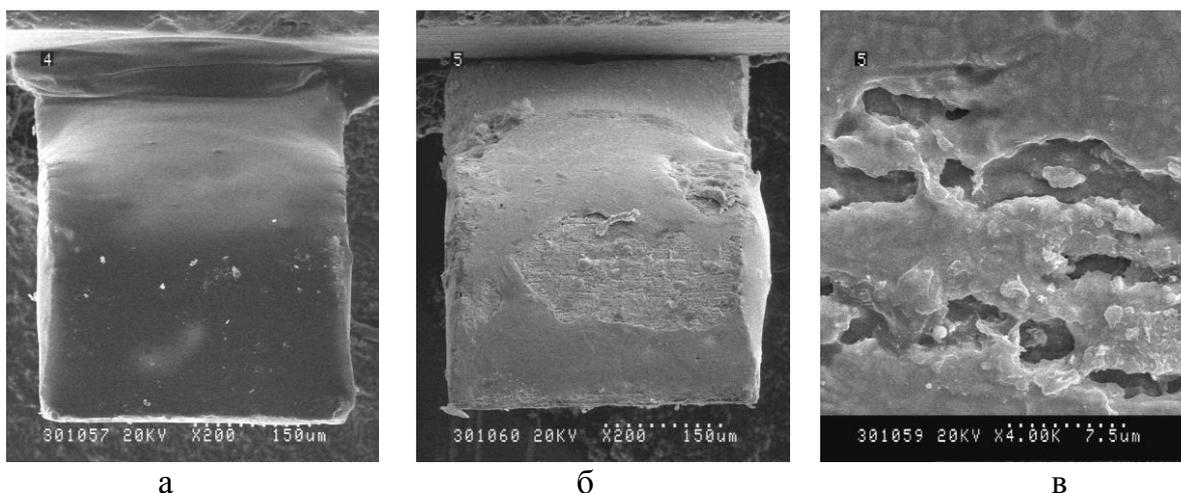


Рис. 12.18. Внешний вид вывода после облуживания припоем и формовки: до нанесения Sn-Bi (а) и после нанесения Sn-Bi (б, в)

Для повышения эксплуатационной надежности транзисторов в пластмассовых корпусах и обеспечения паяемости выводов с покрытием олово-висмут необходимо формовку выводов проводить до осаждения покрытия.

12.5.5. Эффект «надгробного камня»

Эффект «надгробного камня» — это поднятие одного конца чип-компонента, например конденсатора или резистора, когда компонент встает под углом на контактную площадку. Этот эффект также известен как эффект Манхэттена, подъемного моста или Стоунхенджа. Он вызван несбалансированным смачиванием выводов компонента при пайке и, соответственно, несбалансированностью сил поверхностного натяжения расплавленного припоя, действующих на электроды компонента (рис. 12.19). На чип-компонент действуют три силы: вес компонента F_1 ; вертикальный вектор поверхностного натяжения F_2 поверхности расплавленного припоя под компонентом; 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 имеет место, когда сила F_3 превышает сумму сил F_1 и F_2 .

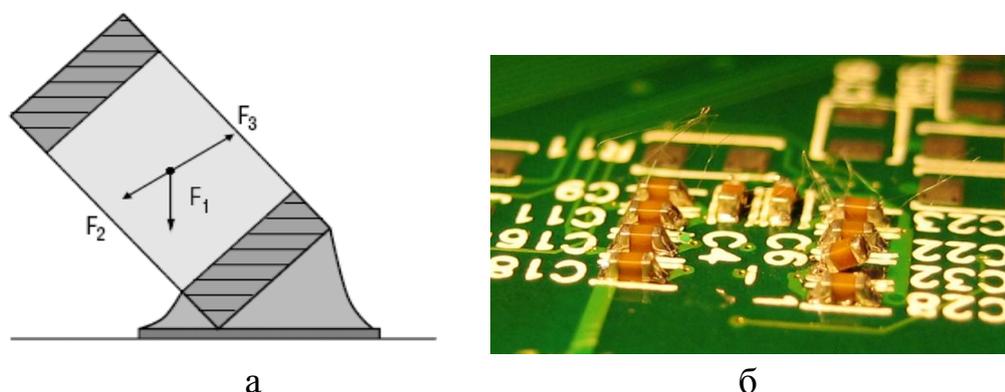


Рис. 12.19. Эффект «надгробного камня»: схема образования (а) и внешний вид (б)

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 служить причиной эффекта «надгробного камня». Слишком малое расстояние приведет к смещению чип компонентов на каплях расплавленного припоя. Слишком большое расстояние послужит причиной легкого отделения одного из выводов от контактной площадки.

Например, для чип резисторов 0805 оптимальный зазор, при котором эффект «надгробного камня» будет минимален, составляет примерно 1 мм. Уменьшение этого зазора привело бы к большему эффекту «надгробного камня», вследствие увеличившегося смещения легких чип компонентов на больших каплях расплавленного припоя. В то же время, минимальное перекрытие выводов чип-компонента и контактных площадок также привело бы к большему эффекту «надгробного камня» вследствие легкого отделения любого из двух выводов от контактной площадки. Следовательно, для 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. 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». ИК 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 приводит к неуравновешенности сил, приложенных к обоим выводам компонента, что 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».

Анализ многочисленных причин возникновения этого дефекта при использовании компонентов типоразмера 0201 выявил, что наибольшее влияние оказывает комбинация смещения отпечатка паяльной пасты по оси X на 0,1 мм и смещение компонента при его установке по осям X и Y на 0,1 мм [5].

Эффект «надгробного камня» может быть устранен при выполнении следующих условий [3].

- использовать большую по ширине и площади металлизацию чип-компонента;
- обеспечить соответствующее расстояние между контактными площадками под чип-компонент;
- применять надлежащее распространение контактных площадок за пределы выводов чип-компонента. Круглые площадки более перспективные, 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;
- использовать меньшую толщину отпечатков;
- повысить точность установки компонентов;
- использовать низкую скорость нагрева при пайке оплавлением. Избегать применения метода пайки в паровой фазе;
- подсушивать пасту перед пайкой или использовать профиль пайки с продолжительной зоной стабилизации для снижения скорости газовой выделенной флюсов;
- использовать профиль пайки с очень низкой скоростью повышения температуры при переходе через температуру плавления припоя;
- использовать флюс с меньшим объемом газовой выделенной;
- использовать паяльную пасту с замедленным оплавлением, например со смесью оловянного порошка или со сплавами с широким диапазоном кашеобразного состояния.

12.5.6. Сдвиг компонента

Сдвиг или смещение компонента относительно предназначенных ему контактных площадок на печатной плате (рис. 12.20) обычно возникает из-за несбалансированности поверхностного натяжения расплавленного припоя на выводах чип-компонента. Он может рассматриваться как ранняя стадия развития эффекта «надгробного камня». Факторы, служащие причиной эффекта «надгробного камня», как правило, также провоцируют сдвиг. Причины сдвига дополняются: подвижкой компонентов потоком теплоносителя; несимметричной формой контактных площадок под чип-компонент; слишком малой шириной металлизации нижней поверхности компонентов; неравномерно плохой паяемостью выводов компонентов; слишком узкими контактными площадками.

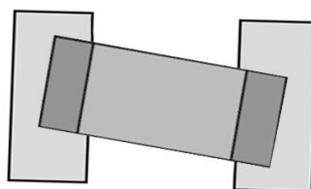


Рис. 12.20. Сдвиг компонента

Уменьшения сдвига можно достичь при следующих условиях [3]:

- снизить скорость нагрева при пайке и 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;
- использовать флюс с меньшей интенсивностью газовыделения или с меньшей скоростью смачивания;
- использовать паяльную пасту с замедленным оплавлением, например, смесь порошков припоя и свинца в составе паяльной пасты.

12.5.7. 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. 12.21. 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 приме-

нения более интенсивного нагрева снизу в некоторых печах оплавления, например в инфракрасной печи оплавления. Если более интенсивный нагрев снизу невозможен вследствие ограничений, налагаемых конструкцией печи, использование низкой скорости повышения температуры позволит теплу распространяться через плату более равномерно, исходя из естественного распространения тепла, и снизить эффект капиллярного оттока припоя.

Причины капиллярного оттока могут быть усугублены неудовлетворительной копланарностью выводов. Кроме того, более легкое смачивание выводов будет способствовать перетоку припоя на выводы. Например, использование легкоплавких финишных покрытий, таких как горячее облуживание выводов в тигле, позволит расплавленному припою из паяльной пасты легко перейти на поверхность выводов.

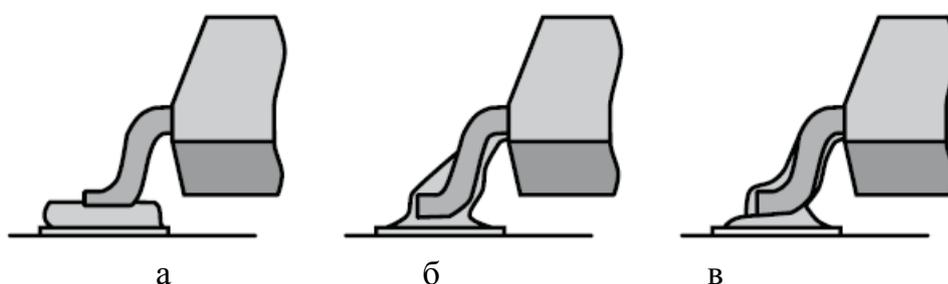


Рис. 12.21. Последовательность стадий капиллярного оттока: вывод помещается в паяльную пасту (а), паста натекает с контактной площадки на вывод (б), расплавленный припой перетекает на вывод при формировании галтели (в)

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. 12.22) – еще одна причина капиллярного оттока припоя. Здесь припой стягивается в сквозное отверстие, оставляя вывод без паяной галтели. Причины такого оттока устраняются посредством: покрытия пути оттока паяльной маской; защитой сквозного отверстия паяльной маской, если оно не монтажное; использованием неплавких финишных покрытий на печатной плате.

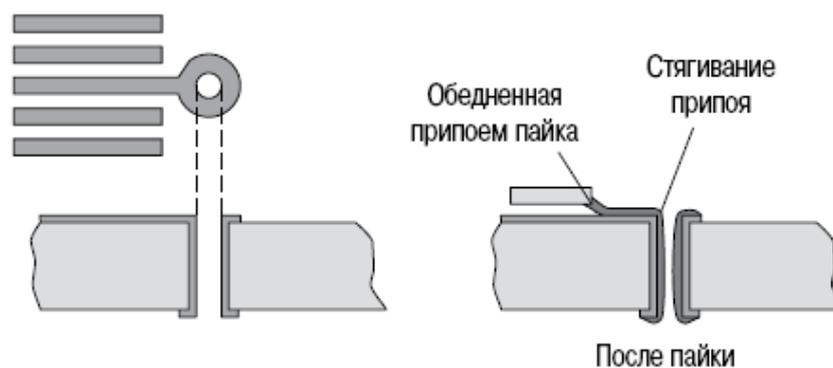


Рис. 12.22. Отток припоя с контактной площадки в металлизированное отверстие

Методы устранения капиллярного оттока припоя следующие [3]:

- использовать меньшую скорость нагрева и избегать пайки в паровой фазе;
- использовать более интенсивный нагрев снизу, чем сверху;
- улучшить копланарность выводов компонентов;
- использовать оловянные финишные покрытия для платы и выводов;
- наносить паяльную маску между контактной площадкой и сквозным отверстием;
 - защитить неиспользуемое отверстие паяльной маской;
 - уменьшить кривизну выводов;
 - использовать пасту с меньшей склонностью к растеканию, например, с более высокой вязкостью;
 - использовать флюс с меньшей скоростью нарастания активности или с более высокой температурой активации;
 - использовать паяльную пасту с широким температурным диапазоном расплавления и отвердевания.

12.5.8. Образование перемычек

Образование перемычек всегда начинается с образования мостиков из паяльной пасты по причинам: нанесения избыточного количества пасты; расползания пасты; избыточного давления при установке компонента; смазывания пасты. Во время пайки избыток пасты образует мостики припоя в зазорах между контактными площадками (рис. 12.23).

Приемы снижения или устранения образования перемычек сводятся к следующим:

- уменьшить объем паяльной пасты с помощью использования трафарета меньшей толщины и уменьшением размеров перфораций в трафарете;
- уменьшить давление при установке компонентов;
- избегать смазывания нанесенной на плату пасты;



Рис. 12.23. Мостики припоя между выводами

- использовать меньшую скорость повышения температуры;
- нагревать плату раньше, чем компоненты, и избегать 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: улучшение паяемости компонентов/оснований; использование флюсов с большей активностью; уменьшение степени окисленности припоя; использование инертной среды нагрева; уменьшение скорости повышения температуры на стадии предварительного нагрева для обеспечения нормального процесса флюсования до оплавления; обеспечение достаточного времени пребывания при максимальной температуре.

12.5.9. Отсутствие электрического контакта

Отсутствие электрического контакта также часто ассоциируется с другими дефектами пайки, такими как эффект «надгробного камня», капиллярный отток припоя или эффект подушки. Эффект подушки — это расположение вывода на

припой, когда припой выдавливается из зоны соединения без образования электрического контакта (рис. 12.24). Он вызван отсутствием смачивания вывода припоем. Методы устранения этого дефекта такие же, как и те, которые используются в случае отсутствия смачивания.

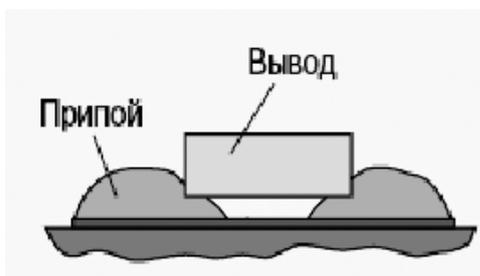


Рис. 12.24.Эффект подушки

Отсутствие электрического контакта может также быть обусловлено смещением при установке компонентов. 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: придание жесткости и прямолинейности корпусов компонентов; 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 компонентов на плате с состаренным HASL-покрытием.

Частным случаем отсутствия электрического контакта является отслаивание галтели припоя и контактной площадки от основания печатной платы. На рис. 12.25 схематически показано паяное соединение вывода компонента QFP до и после отслаивания галтели. Это часто происходит при пайке деформированных выводов. В процессе остывания пайки это механическое напряжение, создаваемое деформированными выводами, ведет себя как пружина при растяжении. Нагрев платы при пайке значительно снижает прочность сцепления контактной площадки с основанием платы, и это приводит к отслаиванию галтели припоя от платы.

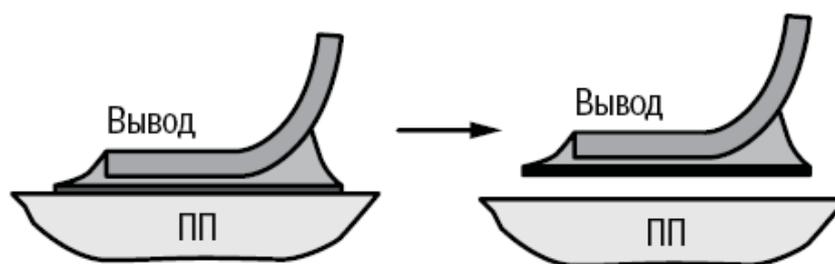


Рис. 12.25. Отслаивание галтели от основания платы

12.5.10. Образование шариков припоя

Образование шариков припоя — наиболее частый дефект, наблюдаемый при использовании 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 (рис. 12.26). Образование шариков недопустимо при отсутствии операции отмывки плат после пайки.



Рис. 12.26. Шарики припоя

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

Образование шариков припоя может быть вызвано неудовлетворительной паяемостью выводов компонентов и финишного покрытия плат. На устранение сильного окисления поверхностей расходуется излишнее количество флюса, что, соответственно, приведет к недостатку флюсующей среды для предотвращения образования шариков припоя. Продолжительное хранение пасты в некондиционных условиях также усугубит образование шариков припоя. Обычно это проявляется в повторном использовании 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% 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, приводит 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 наличием влажной среды. 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 влаж-

ностью 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.

Для уменьшения разбрызгивания и образования шариков припоя:

- не хранить пасту во влажной среде;
- применить операцию сушки паст и плат;
- выбрать температурный профиль с продолжительным предварительным нагревом и режимом стабилизации;
- создать инертную среду в процессе пайки;
- использовать флюс с минимальным количеством гигроскопических составляющих;
- использовать пасты с флюсом, обеспечивающим низкую скорость смачивания.

12.5.11. Образование пустот

Наличие пустот и раковин 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 и раковины в паяных соединениях (рис. 12.27) могут служить причиной перегрева и, следовательно, снижения надежности соединений.



Рис. 12.27. Пустоты (а) и раковины (б) в паяных соединениях

Считается, что в общем случае образование пустот может быть объяснено: сдвигом припоя во время затвердевания; дегазацией материала плат при пайке компонентов, монтируемых в металлизированные отверстия; 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 для оплавления паяльных паст;
- уменьшение скорости предварительного нагрева и стабилизации температуры для полноты протекания реакций с участием флюса до зоны оплавления;
- обеспечение завершения расплавления и смачивания в зоне пайки.

12.6. Методы контроля скрытых дефектов соединений

Применение интегральных микросхем в корпусах BGA, μ BGA, Flip Chip и CSP в современных электронных модулях на печатных платах создает проблему контроля качества паяных соединений, находящихся под корпусами интегральных микросхем и недоступных традиционным визуальным и оптическим методам. Положение также усугубляется увеличением стоимости интегральных микросхем, когда замена является дорогостоящей, трудоёмкой и может привести к выходу из строя всего электронного модуля. Кроме того, необходимо учитывать возможность появления скрытых дефектов, связанных с плохой смачиваемостью и паяемостью выводов и контактных площадок, пустотами в паяных соединениях и пластмассовых корпусах интегральных микросхем, нарушением металлизации переходных отверстий. Все указанные дефекты могут быть эффективно выявлены и локализованы методами рентгеновского контроля.

Рентгеновские теньевые методы, основанные на поглощении излучения веществом, позволяют диагностировать внутреннюю структуру изделия благодаря различному коэффициенту поглощения. Наибольшее применение для выявления микродефектов получили рентгенотелевизионные методы благодаря увеличенному изображению объекта, оперативности контроля и безопасности работы обслуживающего персонала [6].

Компанией Phoenix|XRAI выпущена установка рентгеновского контроля нового поколения rsva|analyzer с нанофокусной трубкой и разрешением 0,5 мкм (рис. 12.28,а), которая позволяет надёжно диагностировать и локализовать следующие типы дефектов: внутри полупроводниковых приборов, качество разварки соединительных проводников, пустоты между подложкой и кристаллом, пустоты в корпусе, качество соединений в BGA (рис. 12.28,б,в).

Применение систем рентгеновского контроля является эффективным средством диагностики технологических дефектов, повышения качества и надёжности выпускаемых изделий за счёт обеспечения контроля каждого паяного

соединения и целостности ИМС. Система рентгеновского контроля FXS-160.40 компании TIGER спроектирована специально для контроля BGA и Flip-Chip, а также пригодна для контроля электромеханических компонентов, сенсоров, катушек, предохранителей и т.д. Для выявления субмикронных дефектов используют систему FOX-160.25 с мощной нанофокусной трубкой, геометрическим увеличением до 2400 раз, 5 степенями свободы и обработкой изображения в реальном масштабе времени.

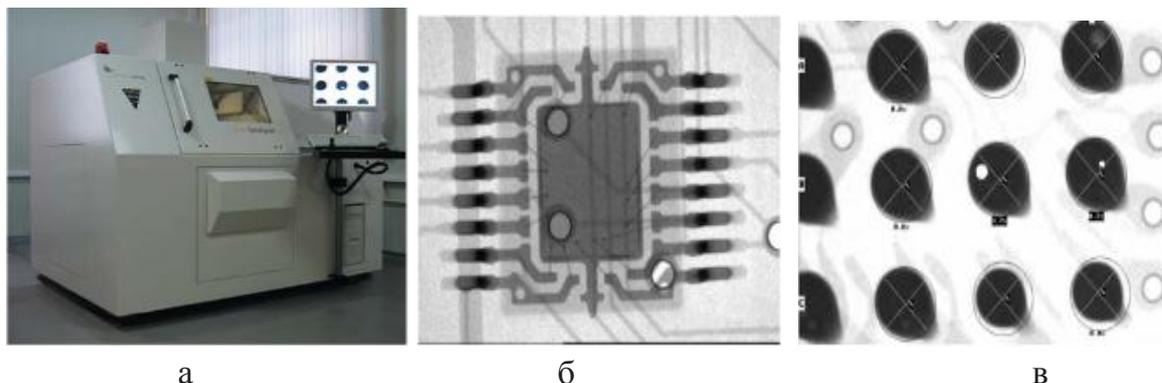


Рис. 12.28. Нанофокусная система рентгеновского контроля (а) внутреннего состояния ИС (б) и качества паяных соединений BGA (в)

Для выявления скрытых дефектов в соединениях, изделиях, анализа напряженно-деформированного состояния материалов применяют акустическую микроскопию с фото- или телерегистрацией результатов анализа. Акустическая микроскопия использует высокочастотные (от 5 до 200 МГц) УЗ колебания и осуществляется методами сквозной передачи и отраженного сигнала. Метод отраженного сигнала, требующий доступа только к одной стороне изделия, позволяет обнаруживать скрытые дефекты при посадке кристаллов, разварке проволочных соединений, монтаже SMD, герметизации электронных модулей.

Цифровой акустический сканирующий микроскоп высокого разрешения D9500 Sonoscan (рис.12.29,а) предназначен для неразрушающего контроля и объемной визуальной инспекции изделий микроэлектроники.



Рис.12.29. Цифровой акустический микроскоп D9500 Sonoscan (а) и акустическое изображение микросхемы в пластиковом корпусе

Благодаря использованию ультразвука становится возможным инспекция однородных материалов, корпусов с высокой толщиной стенок. С ростом частоты УЗ от 5 до 500 МГц глубина проникновения в образец уменьшается, а разрешающая способность растет и достигает 18 мкм. Микроскоп применяется для контроля качества клеевых и паяных соединений кристаллов с подложкой при сборке микромодулей [7]. На рис.12.29,б красным цветом отображены несплошности в компаунде, прикрепляющем кристалл к корпусу.

Для бесконтактного возбуждения и приема акустических колебаний в исследуемых объектах часто используются различные термо– и оптико-акустические эффекты. Если быстро нагреть какой-либо участок твердого тела, то другие его участки нагреваются спустя некоторое время. Локальный нагрев изделия вызовет появление термомеханических напряжений и акустических волн, так как тепловое возмущение распространяется значительно медленнее упругого. В качестве источников нагрева могут быть использованы модулированные по интенсивности источники электромагнитного излучения: лазерные, электронные, ионные. Выбор источника нагрева и частоты модуляции определяется свойствами объекта, необходимой мощностью, чувствительностью и разрешающей способностью аппаратуры, размерами пятна, в которое необходимо сфокусировать излучение.

Термоупругие деформации объекта приводят к возникновению акустических колебаний, регистрация которых осуществляется с помощью пьезоэлектрических датчиков, регистрация деформации области нагрева – с помощью интерферометров и координатных приемников, однако в отличие от «мираж-эффекта» лазерный луч отражается от поверхности в области нагрева.

Принцип действия фотоакустического микроскопа основан на явлении генерации и распространения в объекте тепловых волн, возбуждаемых зондирующим лазерным излучением или электронным пучком, модулированными по интенсивности I_0 . Поглощенное излучение I_a приводит к нагреву и генерации периодических тепловых потоков Q_s и Q_g , распространяющихся соответственно в объекте и от его границы в окружающую газовую среду (рис. 12.30, а). Решением уравнения термодиффузии, отвечающим данной ситуации, являются температурные волны, затухающие в e раз на длине распространения тепла $L_{s,g}$ в твердом теле и окружающей среде (рис. 12.30, б):

$$L_{s,g} = \left(\frac{2k_{s,g}}{\rho_{s,g} c_{s,g} \omega} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (12.5)$$

где $k_{s,g}$ – теплопроводность, $\rho_{s,g}$ – плотность, $c_{s,g}$ – теплоемкость твердого тела и газа соответственно, ω – угловая частота модуляции излучения.

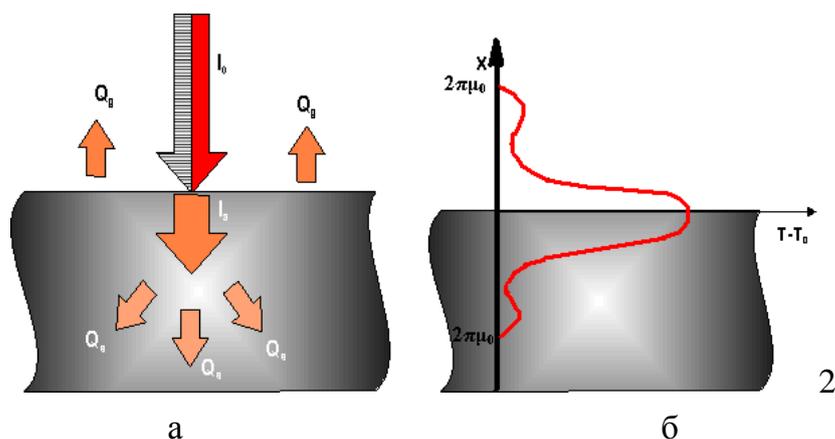


Рис. 12.30. Механизм формирования фотоакустического сигнала

Вследствие периодического нагрева и тепловой деформации локальной области объекта в нем также возбуждаются и распространяются акустические волны той же частоты, что и температурные волны. Это явление получило название фотоакустического эффекта в твердом теле. Акустические колебания объекта регистрируются датчиком. Акустический сигнал, снимаемый с датчика, для каждой выделенной области объекта зависит от ее локальных физических свойств. При сканировании лазерным лучом в двух взаимно ортогональных направлениях формируется фотоакустическое изображение объекта, которое является следствием трех различных процессов: вариации поглощенной мощности излучения вследствие изменения от точки к точке оптических свойств объекта; взаимодействия температурных волн с тепловыми неоднородностями объекта; взаимодействия акустических волн с упругими неоднородностями объекта (рис. 12.31).

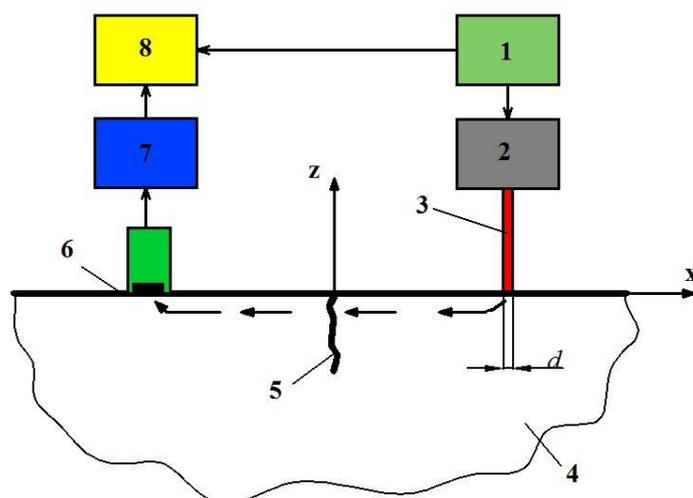


Рис. 12.31. Схема лазерно-акустического микроскопа: 1- лазерный источник, 2 – устройство фокусировки луча, 3 – лазерный луч, 4 – исследуемый объект, 5 – дефект (трещина), 6 – пьезодатчик, 7 – блок преобразования сигнала, 8 - дисплей

Первый процесс несет информацию только об абсорбционно отражательных свойствах образца. При доминировании этого процесса фотоакустическое изображение по существу идентично оптическому изображению. Разрешающая способность определяется диаметром зондирующего луча, а глубина визуализации подповерхностной структуры – глубиной проникновения фотонов.

Второй процесс не встречается ни в оптической, ни в акустической микроскопии, и характеризуется переходом к новому типу волн, взаимодействующих с микронеоднородностями объекта и определяющих формирование изображения. Такой переход дает качественно новую информацию и позволяет существенно расширить наши познания о физических свойствах материалов. Определяется этот процесс термическими свойствами объекта: теплопроводностью, температуропроводностью коэффициентом теплового расширения.

Несмотря на сильное затухание (например, для меди $2 \text{ мм} \geq \mu_s \geq 2 \text{ мкм}$ при изменении частоты модуляции в диапазоне 10 Гц – 10 МГц температурные волны обладают характеристиками обычных волн и поэтому их взаимодействие с тепловыми неоднородностями твердого тела, по аналогии с оптическими и акустическими волнами, можно рассматривать как процессы рассеяния и отражения. Для используемых частот модуляции (до 10 МГц) более длинные, по сравнению с толщиной объекта, генерируемые наряду с температурными, акустические волны не взаимодействуют с объектом и служат лишь носителями информации, полученной за счет распространения температурных волн. Микроскоп, изображение в котором формируется главным образом вследствие взаимодействия температурных волн с тепловыми неоднородностями объекта, наряду с фотоакустическим получил название термоволнового микроскопа (ТВМ). Разрешающая способность ТВМ зависит от размера зондирующего луча и величины μ_s и определяется большим из этих двух параметров, а глубина визуализации оценивается значением μ_s .

Третий процесс несет информацию о механических параметрах объекта. Его необходимо учитывать, если длина акустической волны того же порядка, что и размеры неоднородностей в объекте (обычно это происходит на частотах модуляции, превышающих 100 МГц). При определяющем вкладе данного процесса фотоакустическое изображение идентично акустическому, а разрешающая способность имеет порядок длины звуковой волны.

Акустические методы диагностики: акустическая микроскопия (АМ), сканирующая лазерная акустическая микроскопия (СЛАМ) и фотоакустическая микроскопия (ФАМ) наиболее перспективны при контроле контактных микросоединений в изделиях микроэлектроники и электронной техники, как на этапе разработки, так и в их производстве.

В акустической микроскопии и сканирующей лазерной микроскопии первичная информация получается в результате генерации, взаимодействия и приема чисто акустических колебаний, а в лазерной фотоакустической микроскопии она возникает при оптическом взаимодействии импульсного лазерного излуче-

ния с поверхностью твердого тела. Амплитуда генерируемых акустических колебаний в ФАМ определяется, во-первых, коэффициентом оптического поглощения лазерного излучения в каждой точке поверхности сканируемого объекта и, во-вторых, мощным фоновым сигналом, который возникает вследствие удаления с поверхности объекта различных окислов и загрязнений при первичном сканировании лазерным лучом. Однако оптические, акустические и фоновые составляющие принимаемого фотоакустического сигнала создают на результирующей топограмме сложные изображения, для расшифровки которых требуется опыт и методические разработки.

Лазерная фотоакустическая микроскопия имеет следующие преимущества перед акустической и сканирующей лазерной акустической микроскопией:

- бесконтактное возбуждение акустических колебаний в твердом теле сфокусированным лучом лазера открывает широкие возможности сканирования объектов сложной конфигурации и относительно больших площадей;

- во многих случаях зависимость фотоакустического сигнала от величины оптического поглощения сканируемой поверхности позволяет получать одновременно и топограммы распределения оптического поглощения, а при использовании лазера с перестройкой по длине волны – видеоспектральные топограммы поглощения;

- конструкции АМ и СЛАМ и методики их применения требуют иммерсионного контакта акустической части с объектом, что в случае применения АМ значительно ограничивает площадь сканирования (не более 2x2 см), а для СЛАМ требует полного погружения объекта в ванну с жидкостью. Эти требования исключаются при исследованиях с использованием ФАМ.

Хотя все три метода контроля (ФАМ, АМ и СЛАМ) могут дать в известных пределах идентичные результаты, однако лазерный фотоакустический метод предпочтителен благодаря перечисленным преимуществам, простоте конструкции и эксплуатации. По диапазону возможных применений в электронике фотоакустическая микроскопия является универсальным методом, обеспечивающим решение множества задач контроля, ранее требовавших использования многих и к тому же разрушающих методов. Бесконтактность и локальность оптического возбуждения акустических колебаний позволяют производить быстрое зондирование ответственных зон и участков изделия, а также топографировать распределение характеристик.

Благодаря запоминанию различных промежуточных состояний контролируемого образца, последовательно подвергаемого различным воздействиям, открываются возможности исследования динамики разрушения соединений и определения запасов их прочности. Серьезной проблемой фотоакустических систем является отсутствие метрологической базы, затрудняющей расшифровку получаемых фотоакустических изображений и интерпретацию результатов контроля. Однако отмеченные недостатки фотоакустических систем не умаляют досто-

инств и высокой технико-экономической эффективности этого метода, что подтверждается опытом эксплуатации отечественных диагностических комплексов.

Обработка параметров электрического сигнала обеспечивает возможность получения достоверной информации о неоднородностях внутренней структуры исследуемого объекта. Для интерпретации результатов контроля информация визуализируется в виде цветной 16-градационной двухмерной фотоакустической топограммы, на которой уровень максимальной сплошности (диффузия, адгезия, смачиваемость) материалов представлен чёрным цветом, а по мере увеличения несплошности (расслоения, полости, включения) цветовая гамма меняется до белого цвета, проходя все цветовые оттенки, показанные на шкале (рис. 12.32) [8].



Рис. 12.32. Цветная 16-градационная шкала

Комплекс лазерного фотоакустического диагностирования ПЛАНАР-СО (рис. 12.33) позволяет производить диагностику и неразрушающий контроль качества:

1) присоединения кристаллов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем к основанию корпусов и кристаллодержателей с применением эвтектики, припойных и клеевых композиций;

2) микросварных соединений золотой, алюминиевой, медной и др. проволокой методами термозвуковой, термокомпрессионной, ультразвуковой микросварки;

3) сварных и паяных швов корпусов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем;

4) герметизации интегральных микросхем;

5) монтажа электронных компонентов на подложки (SMD, COB);

6) адгезии металлизированных покрытий к подложкам.

Основными техническими характеристиками комплекса лазерного фотоакустического диагностирования являются:

– увеличение геометрическое от 1:1 до 2500:1 крат на экране монитора 19";

– число градаций отображаемого параметра - 16;

– максимальное поле сканирования - 100x100 мм;

– размеры образца - до 10 мм до 65 мм;

– пространственная разрешающая способность - от 0,5 до 100 мкм;

– чувствительность к нарушению сплошности структуры - до 10 нм.

Увеличенное оптическое изображение микросоединения, выполненного методом ультразвуковой микросварки внахлест алюминиевой проволокой диаметром 250 мкм к алюминиевой металлизации контактной площадки ИС приве-

дено на рис. 12.34,а, а фотоакустическая топограмма, полученная при зондировании лучом УФ лазера диаметром 15 мкм со скоростью 0,048 мм/с на рис. 12.34, б.



Рис. 12.33. Лазерный фотоакустический комплекс

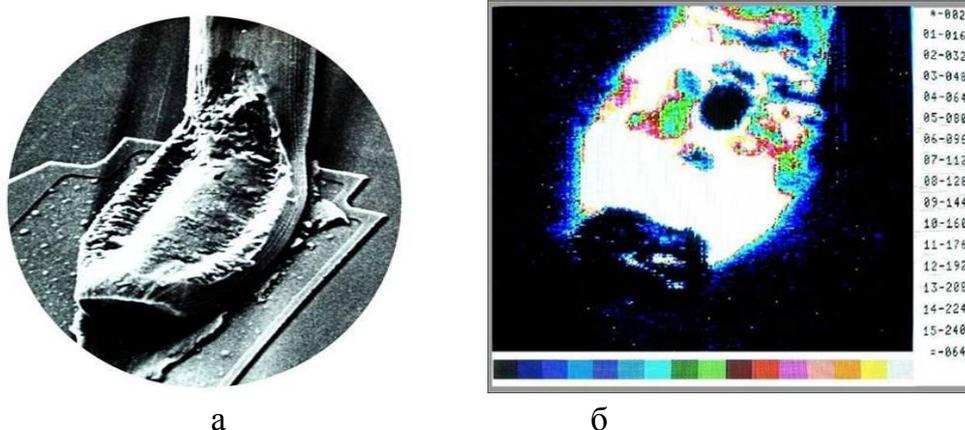


Рис. 12.34. Оптическое изображение (а) и фотоакустическая топограмма микросоединения (б)

Зоны отсутствия сцепления соединяемых материалов (участки светлых тонов) свидетельствуют о некачественном микросоединении, причиной которому может являться недостаточная мощность ультразвука.

Для повышения эксплуатационной надёжности конструктивно сложных изделий электроники с многооперационной технологией их производства необходимо систематический контроль стабильности технологических параметров процесса, а также эффективные методы и средства физико-химического анализа причин отказов, обусловленных скрытыми дефектами. При формировании внутренних межсоединений в изделиях, внедрении новых пресс-материалов для корпусирования изделий, выявления скрытых дефектов эффективным и досто-

верным является метод лазерного фотоакустического диагностирования, хорошо зарекомендовавший себя на практике.

12.7. Надежность паяных соединений

Опыт эксплуатации изделий электроники свидетельствует о том, что отказы паяных соединений проявляются в течение всего срока службы. В основном доминируют два вида отказа: обрыв связи и короткие замыкания, которые практически равновероятны: 45 и 55 %. Обрыв связи в соединениях происходит тогда, когда нагрузка на него превышает его механическую прочность, которая со временем уменьшается в силу окисления, диффузии и образования интерметаллидов в припое.

Согласно нормативным документам количество примесей в припоях строго регламентировано. Однако в процессе пайки в результате растворения в расплавленном припое материалов выводов, металлической разводки МПП, деталей приспособлений, с которыми соприкасается припой, в него могут попасть Си, Al, Sn, Bi, Cd, Ni, Fe, Ag, Au и другие металлы. Большинство из них при достижении определенного для каждого из них предела начинает себя проявлять, меняя свойства припоя и оказывая соответствующее влияние на безотказность и долговечность ИС.

Особенно легко растворяется в припое медь выводов и печатных проводников. Содержание $Cu > 0,3\%$ делает припой более вязким по сравнению с чистым, увеличивается время смачивания. ПС становится хрупким и зернистым. Применение паяльных масок — наиболее эффективный способ замедления процесса насыщения припоя медью. Аналогичное действие на припой оказывает присутствие в нем 0,2 % золота. Оно приводит к снижению прочности контактных соединений.

Присутствие в припое 0,2% цинка ухудшает его растекаемость, повышает температуру пайки, приобретают пористую поверхность, увеличивается скорость окисления поверхности расплавленного припоя. Такое же действие оказывают на качество ПС Al (0,01 %), Cd (0,02 %), Fe (0,02 %). Висмут в количествах 0,25 % вызывает потускнение припоя. Добавка серебра в Pb—Sn-припой значительно повышает его температуру плавления.

В основном насыщение припоя примесями происходит в процессе пайки. Растворение твердых металлов в жидких средах описывается уравнением [9]:

$$dQ/dt = k(C_n - C_\phi) S, \quad (12.6)$$

где dQ/dt — количество вещества, растворяющегося в единицу времени; k — константа скорости растворения; C_n — концентрация насыщенного раствора, C_ϕ — фактическая концентрация раствора в данный момент времени; S — поверхность растворяющегося металла.

Константа скорости растворения, являющаяся основной кинетической характеристикой процесса растворения, определяется скоростями элементарных физических процессов, реализующихся при растворении твердых веществ в жидких. Процесс растворения твердых веществ в жидких относится к гетерогенным реакциям, протекающим в две стадии.

Первая стадия представляет собственно гетерогенную химическую реакцию (реакцию на границе раздела фаз) и заключается в установлении химической связи между атомами на поверхности твердого и жидкого металлов, а также в переходе атомов через межфазную границу. Лишь после завершения первой стадии растворения возникают условия для развития процессов гетеродиффузии, приводящих к изменению химического состава в объеме контактирующих металлов. Следует отметить, что диффузионные процессы начинаются по истечении некоторого промежутка времени, равного периоду релаксации пика межфазной энергии (период ретардации). При длительности контактирования металлов меньше периода ретардации можно получить соединение разнородных металлов без изменения их химического состава.

Однако расчеты показывают, что при взаимодействии расплавленного металла с твердым время задержки диффузионных процессов незначительно по сравнению со временем контактирования металлов при пайке, т. е. в реальных условиях пайки диффузионные процессы практически всегда протекают.

Вторая стадия растворения заключается в отведении атомов растворенного металла от межфазной границы в глубь жидкости. Это происходит в жидкости диффузией и конвекцией (растворенные атомы переносятся жидкостью в процессе ее движения). Конвекция может быть вынужденной и естественной. В последнем случае движение жидкости вызывают локальные изменения ее плотности, возникающие вследствие температурных флуктуации, а также флуктуации состава, неизбежной при растворении. Процессы обогащения припоя посторонними примесями происходят не только в процессе производства ИЭ, но и в условиях эксплуатации. Происходит обогащение припоя медью, атомы которой мигрируют по границам зерен припоя, поступая из металлизации МПП.

В контактах припой—медь происходит и образование интерметаллических соединений медь — олово. Установлено, что механически наиболее слабый участок паяного соединения находится вдоль границы интерметаллического соединения и оставшейся массы припоя. Объясняется это тем, что сюда преимущественно вытесняются из расплава посторонние примеси.

Другой не менее важной проблемой является окисление припоя олово—свинец. Быстрое перемешивание припоя интенсифицирует этот процесс: скорость окисления при пайке волной в 18 раз больше, чем в ванне со спокойным припоем. Олово лучше окисляется, чем свинец, поэтому оксидный слой обогащается оловом, а припой в ванне свинцом. Поэтому в паяльную ванну надо добавлять припой, обогащенный оловом.

Доминирующим механизмом отказов соединений является электрохимическая коррозия, представляющая собой процесс переноса ионов припоя в электролите под действием внешнего электрического смещения. В присутствии влаги происходит растворение свинца и переход ионов Pb^{2+} в водный раствор. Под влиянием электрического смещения между соединением и соседним участком металлизации ионы Pb^{2+} мигрируют в растворе к участкам металлизации под отрицательным потенциалом.

На катоде ионы Pb^{2+} восстанавливаются до атомов и осаждаются в виде дендритов. Последние может приводить к увеличению токов утечки вплоть до коротких замыканий при очень малых расстояниях между участками металлизации, находящимися под разноименными зарядами. Если это расстояние значительно для перекрытия образующимися дендритными цепочками Pb , то преобладающим видом отказа является обрыв в соединениях. Влага в область соединений может попадать как в процессе изготовления ИЭ, так и при эксплуатации из-за негерметичности.

Потенциальным источником отказов соединений является наличие хлоридов. Если в процессе пайки используются канифольные флюсы, то негигроскопичная канифоль герметизирует эти хлориды и предотвращает образование белых продуктов коррозии. Однако если канифоль удаляется с поверхности, а хлоридные загрязнения остаются, то коррозия протекает очень быстро.

Безотказность соединений во многом определяется пористостью, обусловленной в основном испарением летучих фракций из МПП в процессе пайки. Аналогичные явления могут иметь место и в условиях эксплуатации из-за испарения накопленной МПП влаги при повышенных температурах.

Интенсивность отказов позволяет количественно оценить надежность паяных соединений и показывает, какая доля от работающих в период времени t паяных соединений выходит из строя в единицу времени после периода t : $\lambda(t) = f(t)/P(t)$, где $f(t)$ – плотность вероятности времени безотказной работы; $P(t)$ – вероятность безотказной работы. За критерий отказа при испытаниях на надежность принимается полный обрыв соединения или увеличения падения напряжения на нем на один порядок. Примерный временной график (рис. 12.35) проведения испытаний паяных соединений на надежность включает термоциклирование от -60 до 80°C с длительностью цикла 1 ч 1, нормальные условия 2, нагрев до 80°C , выдержку в атмосфере тропической влажности 3, 98%-ная относительная влажность и 40°C 4.

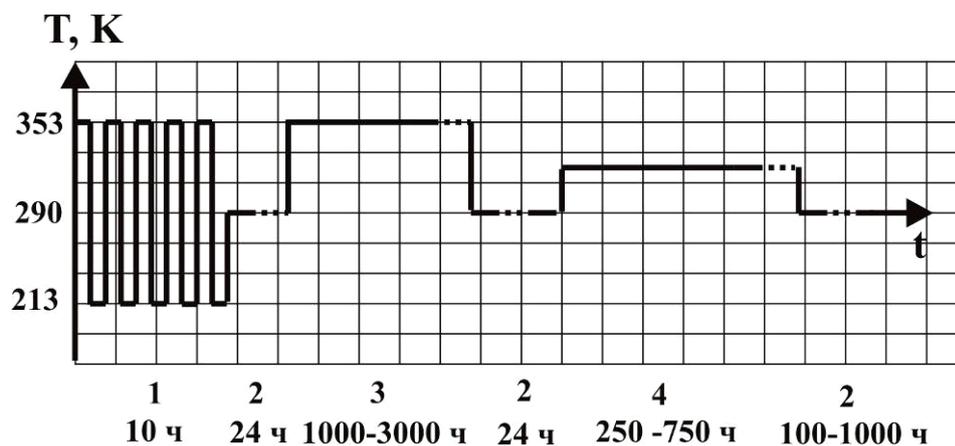


Рис. 12.35. Временной график испытаний паяных соединений на надежность

Для бессвинцовых припоев согласно стандарта IEC-PAS 62137-3 рекомендуются следующие параметры термоциклирования: -40°C в течение 30 мин, $+125^{\circ}\text{C}$ в течение 30 мин. Количество температурных циклов должно быть 500–1000.

Количественно безотказность соединений оценивают интенсивностью отказов—числом отказавших соединений в единицу времени, отнесенным к числу соединений, непрерывно работающих к началу рассматриваемого промежутка времени:

$$\lambda_i(t) = \frac{\Delta n_i}{(N - n)\Delta t_i}, \quad (12.7)$$

где Δn_i —число отказавших соединений за промежуток времени Δt_i , n_i — число соединений, отказавших к началу промежутка времени, N — общее число соединений.

Наиболее полно разработаны вероятностно-статистические методы оценки надежности, которые базируются на представлении анализируемых устройств как совокупности большого числа независимых элементов с постоянными в процессе эксплуатации λ -характеристиками. Сегодня в технические условия на элементы обязательно вводятся требования по статистическим показателям надежности и соответствующим им методам и объемам испытаний. И не случайно к категории надежности в настоящее время причисляют не только безотказность, но и долговечность, сохраняемость и ремонтпригодность.

Однако по мере роста надежности элементов, процессы, определяющие данный параметр посредством соответствующих испытаний, становятся неэффективными. Исходя из принципа равнопрочности элементов совокупности, представляющей ИЭ, возможность восстановления работоспособности монтажа в случае его отказа, полагая, что надежность элементной базы улучшается в 10 раз каждые 10 лет, абсолютное число элементов монтажа растет, а их размер уменьшается пропорционально растущей плотности компоновки элементов, интенсивность отказов элементов печатного монтажа распределяется следующим

образом (табл. 12.2) [10]. Повышенную надежность имеют соединения, выполненные на автоматах с программным управлением профиля нагрева и применением нейтральной среды (азота) для предотвращения образования оксидов на активированных поверхностях.

Подтверждение испытаниями таких показателей надежности за приемлемый интервал времени — процесс чрезвычайно трудоемкий и убыточный, так как требует вовлечения в эксперимент огромного количества образцов изделий. Так, для подтверждения с 95%-ной доверительной вероятностью интенсивности отказов 10^{-7} ч⁻¹ требуется испытать 1000 образцов в течение 10 лет. Для уменьшения времени испытаний до 1000 ч (1,5 месяца) необходимо увеличить объем выборки до 100 тыс. шт., что неэкономично и практически невозможно. Ускоряющими факторами испытаний могут быть повышенная температура и повышенное напряжение. При повышенной температуре ускоряются процессы электромиграции, окисления, образования интерметаллических соединений и коррозии, а при повышенном напряжении — электромиграция, образование дефектов в прилегающих полупроводниковых и изоляционных слоях.

Таблица 12.2. Надежность контактных соединений

Виды соединений	Интенсивность отказов, 1/ч
Пайка вручную	$1,00 \cdot 10^{-9}$
Пайка на автоматах	$1,00 \cdot 10^{-12}$
Пайка в нейтральной среде	$1,00 \cdot 10^{-13}$
Контакты соединений	$1,00 \cdot 10^{-8}$
Концевые печатные контакты	$1,00 \cdot 10^{-6}$
Двусторонние ПП	$1,00 \cdot 10^{-7}$
Многослойные ПП	$1,00 \cdot 10^{-6}$

В общем случае, для многих полупроводниковых приборов и ИМС, долговечность описывается логарифмически нормальным распределением [11]:

$$f(t) = \frac{1}{\alpha t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{\left(\frac{Lnt - \mu}{\sigma} \right)^2}{2} \right], \quad (12.8)$$

где: t — время испытаний, α — параметр, зависящий от условий эксплуатации, μ — логарифм срока службы, σ — среднеквадратическое отклонение срока службы.

Параметр μ имеет нормальное распределение и является линейной функцией нагрузки: $\mu = \alpha + \beta T^{-1}$, где α , β — параметры, характеризующие особенности ИМС и зависит от условий эксплуатации или режимов испытаний. Специалисты

фирмы Analog Devices считают, что 1000 час испытаний в режиме 125°C эквивалентно 10 годам испытаний в режиме 55°C. Термо- и электротренировка ускоряют процессы старения соединений и предназначены для выявления ранних отказов.

Исследования термомеханических свойств соединений, выполненных различными припоями, показали, что при небольших напряжениях (до 15 МПа) скорость ползучести бессвинцовых припоев меньше, чем свинцово-содержащих. При более высоких напряжениях наблюдается обратная картина. В связи с этим крупные компоненты с соответствующими большими различиями в тепловом расширении более критичны при использовании бессвинцовых припоев [12].

Для повышения надежности паяных соединений в ИЭ необходимо обеспечить хорошее смачивание припоем выводов, конструкция соединения должна быть рассчитана на отсутствие постоянного усилия (более 1 Н), прилагаемого к выводам, в соединении не должно быть недостатка припоя, покрытие контактных площадок платы должно защищать от диффузии медной основы. Дополнительными мерами обеспечения надежности паяных соединений являются: контроль состава припоя через каждые 10 часов работы, защита поверхности припоя в ванне нагревостойкой жидкостью, выбор температуры пайки на уровне 20°C выше температуры плавления припоя, применение бесканифольных водосмываемых флюсов.

Востребованы и развиты модели усталостных разрушений применительно к оценке надежности бессвинцовых паяных соединений. Главным источником информации для оценки надежности послужила устойчивость соединений к воздействию термоциклов, провоцирующих термомеханические усталостные разрушения. Необходимо наполнение известных и хорошо отработанных моделей разрушения новыми реологическими характеристиками новых припоев, чтобы использовать их для предсказания надежности бессвинцовых соединений в широком диапазоне их применения.

Для количественного сравнения долговременной устойчивости бессвинцовых паяных соединений используют модель малоцикловых усталостных разрушений Коффина-Мэнсона. Исходя из амплитуд пластических деформаций под действием напряжений в направлении разрушений, оценивается среднее количество циклов до разрушения [13]:

$$N_f = 0,25(\varepsilon_g / \varepsilon_n)^2, \quad (12.9)$$

где ε_g – остаточная деформация при разрыве, ε_n – максимальная пластическая деформация.

Наравне с этим критерием устойчивости соединений к циклическим нагрузкам может использоваться энергия ползучести при деформации в направлении разрушения:

$$N_f = 0,25(\Delta W_u)^2, \quad (12.10)$$

где ΔW_u – максимальная энергия пластической деформации, приходящаяся на цикл нагрузки.

Для анализа малоциклового усталости конструкций с ограниченными усталостными ресурсами (несколько сотен циклов) проведены испытания модуля с флип–чипом на плате. Флип–чип на керамической основе имел два периферийных ряда шариковых выводов с шагом 0,45 мм. Под основаниями шариковых выводов химически осаждался никель NiP. Кристалл размером 6,7х6,7 мм смонтирован на монтажной подложке из материала FR4 с паяльной маской. Покрытие монтажной подложки под пайку — никель-золото по меди .

Испытания проводились на устойчивость к термоциклам «воздух-воздух» при трех температурных диапазонах: -50/+20°C, 0/+70°C и +50/+120°C. Частота смены циклов: 30 мин на цикл с фиксацией на предельных температурах по 10 мин и сменой температур в течение 5 мин. Увеличение усталостной прочности (до 1000 и более циклов) было достигнуто за счет заполнения пространства между кристаллом и монтажной подложкой твердеющим компаундом. Наложения двух механизмов отказов: тепловое расширение компаунда и усталостные разрушения паяных соединений обусловили сложность в анализе результатов испытаний. По данным металлографического анализа, доминирующей причиной отказа явились усталостные разрушения соединений.

Список литературы к главе 12

1. Vanzetti R. Laser inspects solder joints for integrity // *Electronic Packaging and Production*. – 1984. – № 24. – P.116– 121.
2. Арсеньев С. Стандарт IEC-PAS 62137-3. Методы тестирования паяных соединений. Часть 2 // *Технологии в электронной промышленности*. – 2009. – № 1. – С. 40–45.
3. Медведев А.М. Сборка и монтаж электронных устройств.– М.: Техносфера, 2007. – 256 с.
4. Ланин В.Л., Керенцев А.Ф. Дефекты паяных соединений при монтаже внешних выводов транзисторов в силовых блоках // *Технологии в электронной промышленности*. – 2010. – № 3. – С. 58–63.
5. Павлов Н. Анализ причин возникновения дефектов «надгробного камня» при использовании компонентов типоразмера 0201 // *Технологии в электронной промышленности*. – 2008. – № 1. – С. 62–67.
6. Бережной В.П., Дубицкий Л.Г. Выявление причин отказов РЭА. – М.: Радио и связь, 1983.– 232 с.

7. Костюченко, В. Акустическая микроскопия–выявление скрытых дефектов в микроэлектронике / В. Костюченко // Наноиндустрия. – 2012. – № 3(33). – С. 42–46.
8. Волкенштейн С.С., Ланин В.Л., Хмыль А.А. Лазерная фотоакустическая диагностика скрытых дефектов в изделиях электроники // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 11. – С. 46–49.
9. Литвинский, И.Е., Прохоренко В.А., Смирнов А.Н. Обеспечение безотказности микроэлектронной радиоаппаратуры на этапе производства. – Минск: Беларусь, 1989. – 191 с.
10. Медведев А.М. Технологическое обеспечение надежности межсоединений // Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 5. – С. 60– 61.
11. Горлов М.И., Емельянов В.А., Строгонов А.В. Геронтология кремниевых интегральных схем. – М.: Наука, 2004. – 240 с.
12. Новоттник М., Новиков А. Надежность бессвинцовых электронных узлов // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 1. – С. 54–57.
13. Медведев А.М. Модели усталостных разрушений паяных соединений // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. – 2007. – № 2. – С. 41–44.