

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического приборостроения

В. П. Ларин

ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ.
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ ПАЙКИ И
ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2002

УДК 621.791.3
ББК 30.61
Л25

Ларин В. П.

Л25 Технология пайки. Методы исследования процессов пайки и паяных соединений: Учеб. пособие/ СПбГУАП. СПб., 2002. 42 с.: ил.

Пособие содержит материалы по физико-химическим и физико-механическим основам образования паяных соединений. Рассмотрены технологические основы получения качественного паяного соединения, дана характеристика процесса пайки, типовые дефекты и мероприятия по их предотвращению.

Исследовательская часть пособия содержит анализ отказов паяных соединений, определение зависимости качества пайки от различных факторов, методы контроля и др.

Пособие предназначено для использования при изучении теоретических разделов технологических дисциплин студентами различных технических специальностей; для углубленного изучения проблемы в дисциплинах специальностей 191000 (Технология приборостроения), 220500 (Проектирование и технология электронно-вычислительных средств), 200800 (Проектирование и технология радиоэлектронных средств); при подготовке к лабораторным работам по циклам «Физико-химические основы технологии», «Технический контроль», «Надежность и обеспечение качества», «Технология приборостроения»; в курсовых технологических проектах; для подготовки аспирантов по программе кандидатского минимума по специальностям 05.11.13 и 05.11.14.

Рецензенты:

кафедра технологии электронных средств, микроэлектроники и материалов Санкт-Петербургского университета телекоммуникаций; доктор технических наук профессор *Ю. З. Бубнов*

Утверждено

редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

© Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения, 2002
© В. П. Ларин, 2002

ВВЕДЕНИЕ

Основным способом создания неразъемного соединения выводов навесных компонентов с контактными площадками печатных плат является пайка.

Исследования процессов пайки и паяных соединений проведены с целью изучения механизма образования паяного соединения и условий получения качественного соединения, обеспечения характеристик процесса пайки и управления параметрами операций.

Под пайкой понимают связывание или дополнение металлов в твердом состоянии путем введения в зазор расплавленного связующего металлического материала (припоя). Если температура плавления припоя лежит ниже 450 °С, то говорят о мягкой пайке, если выше – о твердой пайке.

Все известные в настоящее время методы мягкой пайки при монтаже компонентов на печатные платы (ПП) можно разделить по технологии выполнения на индивидуальные и групповые.

К индивидуальным методам относятся: пайка ручным паяльником; механизированная или автоматизированная пайка горячим стержнем различного профиля и формы (конусообразным, расщепленным); пайка горячим призматическим паяльником (или так называемым «групповым паяльником», одновременно прижимаемым к планарным выводам микросхемы с одной или двух сторон); точечная электродуговая пайка; пайка сопротивлением; пайка микропламенем; пайка световым лучом; пайка электронным лучом; пайка лазерным лучом.

К групповым методам относятся различные виды пайки погружением, ее разновидность – пайка в ванне с подвижным зеркалом (например, пайка волной припоя). Особую подгруппу составляют так называемые методы оплавления предварительно нанесенной припойной пасты – инфракрасная пайка и конденсационная (парофазная) пайка.

Важнейшими критериями выбора метода пайки компонентов на ПП являются:

- вид контактируемых материалов;
- конструктивные параметры ПП (шаг координатной сетки, размеры и форма контактных площадок, зазоры между ними, толщина материала площадки и др.);

элементная база и способ установки на ПП (материал корпуса, форма и размеры выводов, монтаж в отверстия, планарно или безвыводной монтаж);

условия эксплуатации аппаратуры;

термическая устойчивость ПП и компонентов;

механическая устойчивость ПП и компонентов;

экономические факторы;

постоянство характеристик метода с позиции надежности контактирования.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПАЯНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Низкое электрическое переходное сопротивление и хорошая механическая стабильность достигаются наиболее надежно при объединении контактируемых металлов за счет сил атомной связи.

Большинство физических свойств, например, прочность, твердость, эластичность, теплопроводность и электропроводность, намагничиваемость, скорость роста и растворения зависят от направления кристаллической решетки.

Различные физические и химические свойства металлов, обусловленные специфической электронной структурой и строением решетки, определяют возможность и форму металлической связи.

При контактировании различных металлов с подводом тепла возможны следующие формы образующих связей:

образование гомогенных кристаллов;

образование смеси кристаллов (т. е. образование не общих кристаллов, а получение структуры из смеси отдельных кристаллов);

образование твердых растворов (растворы замещения);

получение интерметаллической фазы.

Чтобы получить металлическую связь в одной из перечисленных форм, необходимо сблизить атомы металлов до межатомных расстояний, т. е. в области до 10^{-8} м. При этом в зону соединения тем или иным образом вводится определенный вид энергии: нагрев; давление; трение или их дозированные комбинации.

Образование диффузионной зоны от 0,1 до 1 мкм является надежным признаком того, чтобы произошла желаемая металлическая связь.

Отсутствие диффузионной зоны указывает на недостаточную связь, в лучшем случае адгезионную. Паяное соединение, в котором не наблюдается образования сплава между припоем и выводом элемента, является первоначальной ступенью так называемой холодной пайки.

2. УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННОГО ПАЯНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Образование качественного паяного соединения осуществляется в следующей последовательности:

- подготовка металлических поверхностей с помощью флюса;
- нагрев выше точки плавления припоя;
- вытеснение флюса с помощью поступающего припоя;
- растекание жидкого припоя по металлической поверхности – процесс смачивания;

- диффузия атомов из твердой металлической фазы в жидкий припой и наоборот – образование сплавной зоны;

- последующая обработка паяных соединений – очистка, когда удаляются флюсы, способствующие коррозии.

Флюс является неметаллическим материалом, который создает условия для прочной связи на месте пайки. Механизм взаимодействия флюса и поверхностей, предназначенных для выполнения паяного соединения, описывается следующим образом:

- быстрое и эффективное смачивание металлической поверхности благодаря влиянию сил поверхностного натяжения;

- удаление окисных слоев на контактируемых металлах, а также растворение и удаление продуктов реакции при температуре ниже температуры плавления припоя;

- защита очищенных металлических поверхностей от нового окисления.

Остатки флюса должны легко удаляться или быть нейтральными, т. е. не должны изменять электрические параметры исходного материала и не вызывать коррозии.

Типичный состав флюса, применяемого при пайке электронной аппаратуры: 20–25% канифоли, 5% салициловой кислоты, остальное – этиловый или изопропиловый спирт.

В качестве припоев используются металлы, чаще всего сплавы, которые расплавляются ниже температуры плавления контактируемых

металлов. Припой должны содержать компоненты, которые могут образовывать сплавы с соединяемыми металлами. Относительно невысокая термическая стойкость почти всех элементов монтажа и плат ограничивает температуру пайки до 300°C. Поэтому применяются только припои с низкой температурой плавления.

Наибольшее применение имеют припои на основе олова и свинца. Возможные фазы сплавов Sn-Pb и их соотношения могут образовывать два вида твердых растворов: богатый свинцом α -твердый раствор и богатый оловом β -твердый раствор. При температуре 183 °C, эвтектическом составе 61,9% Sn и 38,1% Pb образуется эвтектика, т. е. из сплава выделяются одновременно α -раствор и β -раствор, минуя область двух фаз. Поскольку α - и β -растворы растут одновременно, то они распределяются очень тонко.

Одной из основных задач получения качественных и надежных соединений в сборочно-монтажном производстве является сведение к минимуму процессов массообмена на межфазной границе.

Наиболее полное представление о физических процессах, протекающих в паяном соединении, дает модель растворения в зазоре с учетом граничной кинетики, которая представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающих условия массобаланса в твердой и жидкой фазах и движение межфазной границы в зависимости от взаимной растворимости на различных стадиях процесса. Данная модель позволяет анализировать время завершения стадии граничной кинетики τ_r , изменение состава $v_i(\tau)$ на движущейся границе $\xi(\tau)$, ширину диффузионных зон $\delta_i(\tau)$ и профили концентраций $C_i(x, t)$, а также положение межфазной границы $y(t)$. При этом имеется возможность оценить предельные параметры процесса пайки, обеспечивающие получение максимальной прочности паяных соединений. В процессе пайки интегральных микросхем (ИМС) с планарными выводами на ПП имеет место контактирование жидкой фазы припоя с медной контактной площадкой ПП и позолоченным выводом микросхемы (толщина покрытия 4–6 мкм). Таким образом, зазор (рис. 2.1, *a*) ограничен снизу твердой фазой Cu, сверху – твердой фазой Au. Расчет кинетических параметров выполнялся для двух значений температуры ($T = 200, 270^\circ\text{C}$) и для двух случаев взаимодействия твердой и жидкой фаз (Cu+Sn, Au+Sn), при контактировании которых образуются интерметаллиды, оказывающие существенное влияние на снижение прочностных свойств паяных соединений.

Взаимодействие свинца с медью и золотом не рассматривалось в силу практически полного отсутствия их взаимной растворимости. Фрагмент диаграммы состояний сплавов с выбором значений растворимости металла А в припое В для заданных значений температур T_1 показан на рис. 2.1, б. Схематичное распределение концентрации $C_i(x, t)$ в фазах А и В на стадии граничной кинетики, которая завершается при достижении со стороны жидкой фазы равновесной концентрации C_2^p показано на рис. 2.1, в. При этом межфазная граница $y(\tau)$ проходит расстояние $\xi(\tau_r)$ в Au ($\xi(\tau_H) =$ от 3,62 до 6,72 мкм), несколько больше, чем в Cu ($\xi(\tau_H) =$ от 3,48 до 5,85 мкм). Следовательно, на стадии диффузионной кинетики покрытие успевает полностью раствориться в припое. Если растворимость Au в припое в рассматриваемом температурном диапазоне выше, чем у Cu, то за время τ_H в зазоре образуется больше интерметаллида Au-Sn. Таким образом, для предотвращения образования интерметаллических соединений в паяном зазоре процесс пайки необходимо прекращать после завершения стадии граничной кинетики, т.е. время пайки не должно превышать 0,33–0,4 с и ширина диффузионной зоны в твердой фазе становится равной $\delta_1(\tau) = z_1(\tau) - y(t)$, в жидкой фазе – $\delta_2(\tau) = z_2(\tau) - y(t)$.

Схематичное распределение концентрации $C_i(x, t)$ в фазах А и В при диффузионной кинетике растворения (стадия насыщения) в завершении, когда в середине зазора a концентрация со стороны жидкой фазы достигает 99% от значения C_2^p показано на рис. 2.1, г.

Таблица 2.1

Кинетические параметры растворения в зазоре с учетом граничной кинетики с $\chi = 1/l = 50$ мкм

Система	Температура $T_1, ^\circ\text{C}$	Растворимость $E = \Delta 22/ \Delta$	Время протекания кинетических стадий, с		Расстояние, пройденное границей, мкм		$\tau_r / \tau_H, \%$
			τ_r	τ_H	$-\xi(\tau_r)$	$-\xi(\tau_H)$	
Cu + Sn	200	0,03	0,330	1,02	1,01	1,54	32,3
Cu + Sn	270	0,1	0,320	1,128	3,48	5,85	28,3
Au + Sn	200	0,05	0,321	1,022	1,06	1,71	31,4
Au + Sn	270	0,02	0,305	1,164	3,62	6,72	26,2

Анализ результатов расчетов, помещенных в табл. 2.1, позволяет сделать вывод, что в диапазоне $T_1 = 200\text{--}270$ °С во всех рассматриваемых случаях стадия граничной кинетики завершается за $\tau_r = 0,30\text{--}0,33$ с. На-

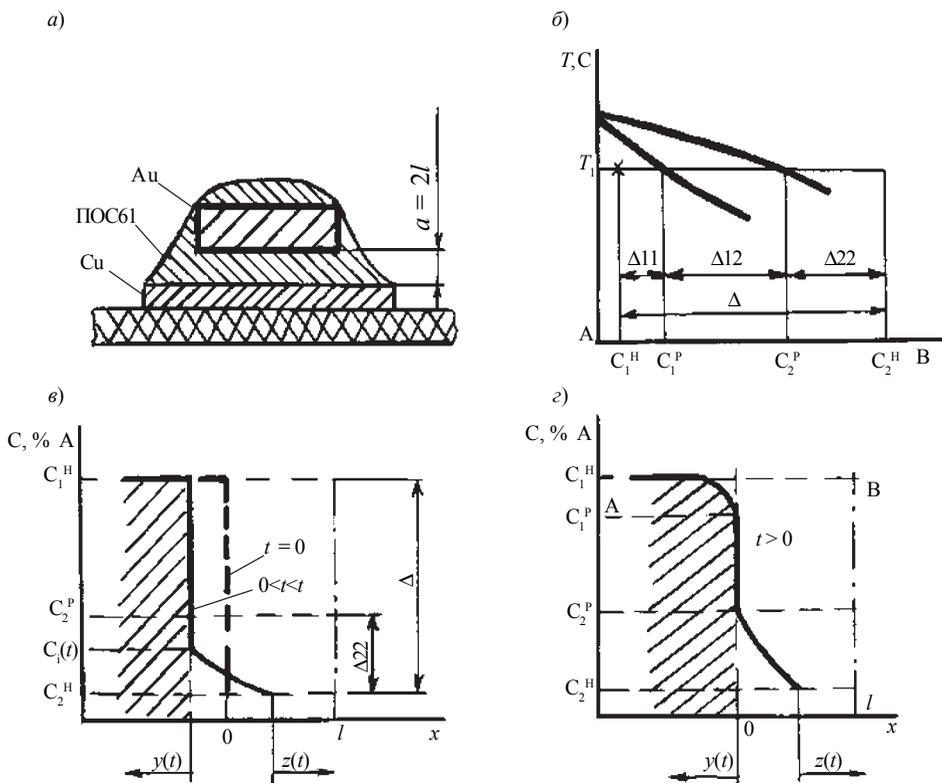


Рис. 2.1. Схема взаимодействия металла А (состава C_1^H) с припоем В (состава C_2^H) в процессе растворения: а – сечение паяного соединения; б – участок диаграммы состояния с обозначением начальных и равновесных концентраций; в – схематическое распределение концентраций (%) А на стадии граничной кинетики; г – то же, на стадии диффузионной кинетики (насыщения)

сыщение зазора наступает за $\tau_n = 1,0-1,16$ с. При этом расстояние межфазной границы в Au ($\xi(\tau_n) = \text{от } 3,62 - \text{до } 6,72$ мкм), несколько больше, чем в Cu ($\xi(\tau_n) = \text{от } 3,48 - \text{до } 5,85$ мкм). Следовательно, на стадии диффузионной кинетики покрытие успевает полностью раствориться в припое. Если растворимость Au в припое в рассматриваемом температурном диапазоне выше, чем у Cu, то за время τ_n в зазоре образуется больше интерметаллида Au-Sn. Таким образом, для предотвращения образования интерметаллических соединений в паяном зазоре процесс пайки необходимо прекращать после завершения стадии граничной кинетики, т. е. время пайки не должно превышать 0,33–0,4 с.

В результате испытаний механической прочности паяных соединений, выполненных лазерной пайкой с применением паяльной пасты на основе порошка припоя ПОС61 при $T = 230\text{--}250\text{ }^\circ\text{C}$ и времени 0,4–0,5 с, зафиксированы значения $0,95 \pm 0,13$ кг/с. По сравнению с результатами, получаемыми при ручной пайке паяльником ($0,37 \pm 0,22$ кг/с), прочность повышается в 3–4 раза. Кроме того, разброс значений прочности при лазерной пайке значительно меньше. Это объясняется более высокой стабильностью температурно-временных режимов лазерной пайки. Анализ шлифов показывает отсутствие интерметаллидов в паяных соединениях, выполненных лазерной пайкой в рассчитанных температурно-временных режимах.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ПАЙКИ

Когда расплавленный припой попадает на чистые металлические поверхности контактирующих металлов, происходит решающий этап пайки – смачивание металлических поверхностей. Под смачиванием понимают свойство основного вещества при образовании поверхностного сплава покрываться тонким, сплошным, прочносцепленным слоем припоя. Процесс смачивания выдвигает проблему соотношения граничных поверхностных энергий системы “металлическое твердое тело – жидкий припой – газообразный или жидкий флюс”.

Флюсы создаются на основе легколетучих компонентов микроатмосферы, что обеспечивает припою и основному веществу возможность адсорбировать поверхностно-активный кислород, а также частично выделять его, благодаря чему изменяется поверхностное натяжение и способность смачивания. Количественные соотношения между поверхностным натяжением, граничным поверхностным натяжением и краевым углом по уравнению Юнга следующие (рис. 3.1):

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{\text{В}} - \sigma_{\text{П-В}}}{\sigma_{\text{П-Ж}}}, \quad (1)$$

где θ – угол смачивания (краевой угол, контактный угол); $\sigma_{\text{В}}$ – поверхностное натяжение основного вещества; $\sigma_{\text{П-В}}$ – поверхностное натяжение между припоем и основным материалом; $\sigma_{\text{П-Ж}}$ – поверхностное натяжение жидкого припоя.

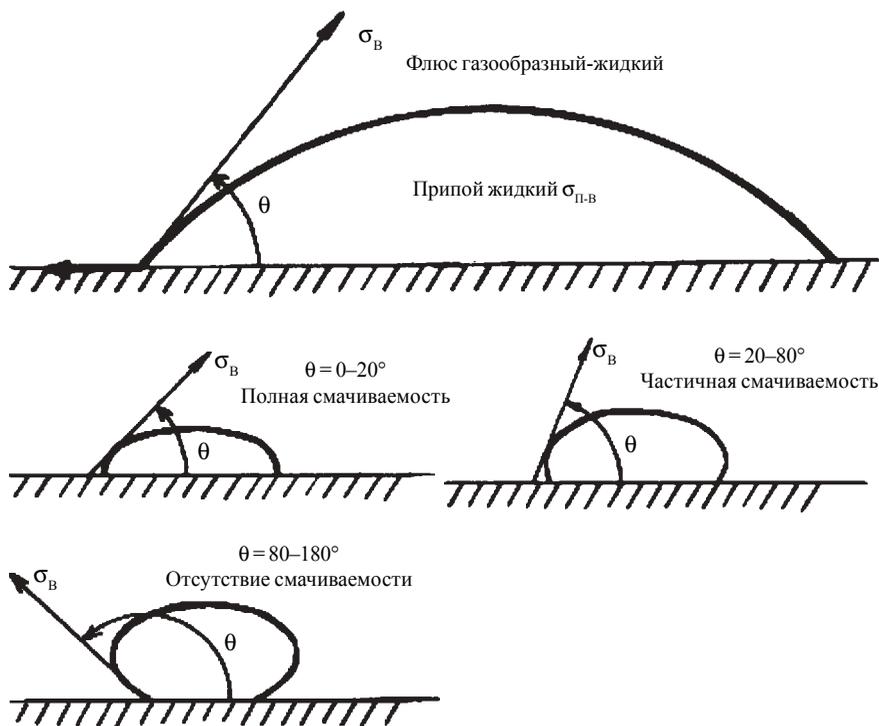


Рис. 3.1. Смачивание твердого вещества

Через работу адгезии W_A выражается зависимость друг от друга сил поверхностного натяжения на границе трех фаз по соотношению Дюпре:

$$W_A = \sigma_B + \sigma_{П.Ж} - \sigma_{П-В}. \quad (2)$$

Поверхностное натяжение на границе σ_B зависит от сил взаимодействия между припоем и основным материалом. Оно может меняться благодаря начинающейся диффузии и образованию сплавов между припоем и основным материалом независимо от поверхностного натяжения σ_B и $\sigma_{П.Ж}$. Если при этом уменьшается поверхностное натяжение на границе $\sigma_{П-В}$, то это означает по соотношению (1) лучшее смачивание. Если W_A принять постоянным и подставить соотношение (2) в соотношение (1), то получим:

$$\cos \theta = \frac{W_A - \sigma_{П.Ж}}{\sigma_{П.Ж}}.$$

Отсюда ясно, что уменьшение поверхностного натяжения припоя приводит к соответствующему уменьшению угла смачивания.

При этом возникает возможность целенаправленно влиять на поверхностное натяжение, при котором используются соответствующие элементы сплава припоя или компоненты флюса, которые адсорбируются поверхностью припоя. Поверхностное натяжение основного материала может также изменяться благодаря адсорбции компонентов флюса. Если при этом увеличить поверхностное натяжение $\sigma_{\text{в}}$, то смачиваемость становится лучше, т. е. угол смачивания θ становится меньше.

Таким образом, смачивание как решающий фактор процесса пайки может улучшаться в основном посредством поверхностно-активных веществ флюсов. Это имеет особое значение при групповых методах пайки, например, при пайке волной, при которой одновременно смачивается множество мест контактирования за небольшой промежуток времени.

Повышение температуры имеет решающее влияние на процесс смачивания. Температура и время – два основных параметра, влияющих на процесс диффузии. Различают температуру смачивания и рабочую температуру. Температурой смачивания является такая температура, до которой должен нагреваться основной материал, с тем, чтобы поступающий жидкий припой мог смочить основной материал. Для образования процесса связи она является решающей температурой. В противоположность этому рабочей температурой является такая температура, которую должен достигать основной материал на поверхности соприкосновения «основное вещество – жидкий припой», чтобы припой мог расширяться, расплавиться и связаться.

Для оценки паяемости металлов применяются методы, связанные с определением площади или высоты растекшегося припоя по паяемой поверхности. Коэффициент растекания припоя K_p в первом случае определяется как

$$K_p = \frac{S_p}{S_0},$$

где S_p и S_0 – соответственно площади растекшегося припоя и его исходной дозы.

Во втором случае K_p может быть определен с помощью отношения

$$K_p = \frac{D_k - H_k}{D_k},$$

где D_k – диаметр гипотетической капли припоя; H_k – высота капли растекшегося припоя.

Величина D_k определяется из предположения отсутствия влияния силы тяжести исходной дозы припоя

$$D_k = \sqrt{\frac{6m}{\pi\rho}},$$

где m – масса дозы припоя; ρ – плотность припоя в расплавленном состоянии.

Значения коэффициентов растекания припоя, определенные по приведенным выражениям, оказываются различными, поскольку в первом случае $S_p > S_0$ и $K_p > 1$, а во втором случае $H_k < D_k$ и $K_p < 1$. Это затрудняет сравнение данных о паяемости покрытий. Кроме того, при определении K_p в первом случае необходимо регламентировать массу исходной дозы припоя, которая оказывает влияние на площадь растекания припоя. Во втором случае диаметр гипотетической капли припоя не учитывает влияния сил тяжести, что занижает значения коэффициента растекания.

Для учета массы исходной дозы расплавленного припоя и влияния факторов внешней среды необходимо рассмотреть условия равновесия «лежащей» капли на несмачиваемой поверхности (рис. 3.2).

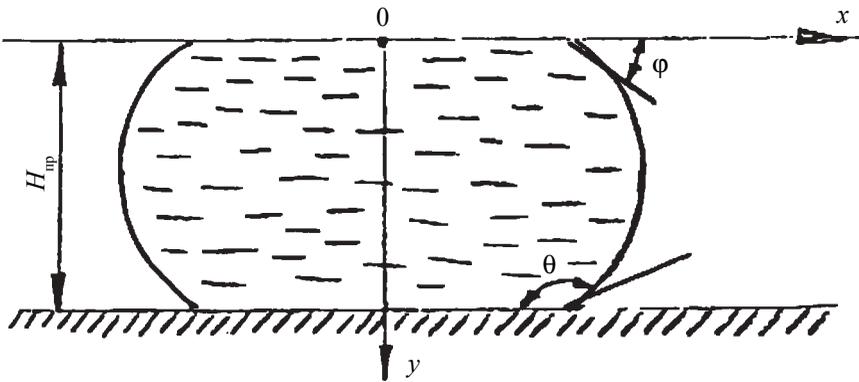


Рис. 3.2. Схема равновесия лежащей капли припоя на поверхности твердого тела

Условие равновесия определяется уравнением

$$\sigma_{п.ж} \sin \varphi \frac{d\varphi}{dy} = \rho g y,$$

где $\sigma_{\text{п.ж}}$ – коэффициент поверхностного натяжения расплавленного припоя; g – ускорение силы тяжести; y – текущая координата.

Из решения уравнения может быть определена высота «лежащей» капли припоя

$$H_{\text{п.р}} = \sqrt{\frac{2\sigma_{\text{п.ж}}(1 - \cos\theta)}{\rho g}},$$

где θ – угол смачивания поверхности припоем.

Таким образом, высота «лежащей» капли расплавленного припоя на несмачиваемой поверхности определяется углом смачивания.

Реальные углы смачивания навески припоя ПОС61 массой 250 мг на медной подложке, имеющей степень шероховатости, равную 2,5 мкм, в отсутствие флюса, измеренные на установке контроля углов смачивания УКУС–1, составляют 100–120°. Рассчитанные значения высоты «лежащей» капли припоя в зависимости от углов смачивания (90–180°) приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Значения высоты капли припоя

Параметры капли припоя	Измеренные величины									
	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
θ , град	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$\cos \theta$	0	-0,17	-0,34	-0,5	-0,64	-0,77	-0,87	-0,94	-0,98	-1
$H_{\text{к}}$, мм	3,57	3,80	4,13	4,38	4,57	4,75	4,88	4,87	5,02	5,05

Учитывая, что в реальных условиях пайки высота «лежащей» капли расплавленного припоя $H_{\text{п.р}}$ всегда меньше диаметра гипотетической сферы припоя $D_{\text{к}}$, расчет коэффициента растекания припоя $K_{\text{р}}$ необходимо проводить с использованием выражения:

$$K_{\text{р}} = \frac{H_{\text{п.р}} - H_{\text{к}}}{H_{\text{п.р}}} 100\%.$$

4. КАЧЕСТВО ПАЯНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Качество паяного соединения определяется многочисленными факторами, состав которых зависит от метода пайки.

Схема, показывающая состав различных групп факторов, влияющих на качество паяных соединений при пайке волной припоя, приведена на рис. 4.1.

Таблица 4.1

Основные дефекты пайки

Дефект пайки	Причины появления
Непропай	Несоблюдение необходимого соотношения между диаметрами отверстия и вывода компонента Недостаточное количество флюса Плохая прилипаемость олова из-за загрязнения поверхности Нарушение режима нагрева
Перемычки	Неправильное конструктивное оформление платы, близкорасположенные проводники Избыток олова при ручной пайке
Сосульки	Низкая температура пайки Недостаточное время пайки
«Холодная пайка» характеризуется матовым цветом и микротрещинами на поверхности	Смещение олова или компонента в момент кристаллизации олова (необходима вторичная пайка)
Налипание припоя к поверхности платы	Неправильный выбор материала защитной маски при изготовлении печатной платы Он взаимодействует с флюсом и задерживает олово
Трещины в паяных соединениях	Значительные различия в температурных коэффициентах линейного расширения припоя, печатной платы, медных проводников, выводов компонента
Раковины и газовые поры	Неправильный выбор или низкое качество диэлектрического основания платы Перегрев печатной платы и разложение диэлектрического основания
Белый осадок	Неправильный состав флюса или материала защитного покрытия. Удаляется промывкой
Темный осадок	Неполное удаление остатков флюса Несовместимость флюса с составом защитного покрытия плат. Удаляется промывкой

Большинство из приведенных факторов влияют на качество паяных соединений и при других методах пайки. Однако в каждом методе имеются специфические факторы.

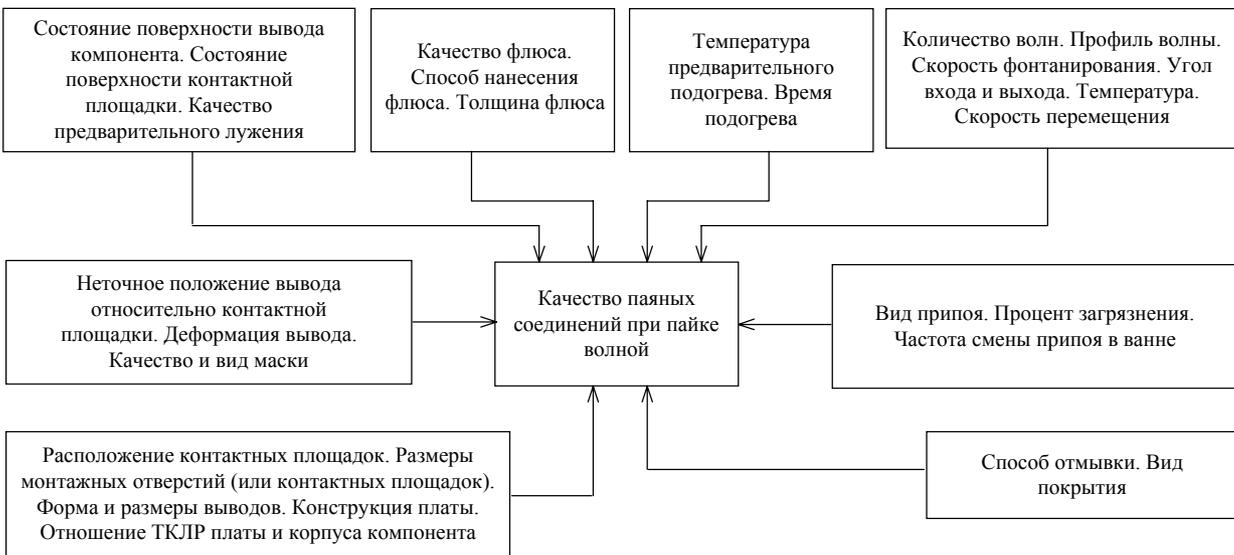


Рис. 4.1. Факторы, влияющие на качество паяных соединений при пайке волной припоя

Так, при пайке лазерным лучом к таким факторам относятся: мощность лазерного излучения; соотношение мощности излучения и скорости перемещения платы; марка паяльной пасты и ее качество; толщина слоя паяльной пасты; диаметр пятна лазерного луча.

При инфракрасной пайке специфическими факторами являются: температура предварительного нагрева платы; температура зоны пайки; время нахождения платы в зоне, марка паяльной пасты и ее качество; толщина слоя паяльной пасты; скорость охлаждения платы.

При конденсационной пайке: температура предварительного нагрева платы; время нахождения платы в зоне пайки; температура в зоне пайки; скорость охлаждения; толщина слоя паяльной пасты; марка паяльной пасты и ее качество.

Рассмотренные факторы влияют на наличие тех или иных дефектов пайки и определяют их вид. Приведем основные дефекты пайки и причины их появления (табл 4.1).

5. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Для измерения высоты капли припоя после растекания используется прибор, в основу которого положен принцип бесконтактного измерения с помощью индуктивного преобразователя (рис. 5.1). Схема прибора содержит индуктивный преобразователь 4, высокочастотный генератор 1, измеритель частоты генератора 2 и регистрирующий прибор 3. В осевом отверстии катушки индуктивности преобразователя жестко закреплена игла 5 из материала, смачиваемого припоем 6. Игла устанавливается на исследуемую поверхность образца 7, длина иглы должна превышать высоту каплей припоя при полной несмачиваемости исследуемого металла. Для расплавления припоя используют нагреватель 8. Перед началом испытаний в центре образца с гальваническим покрытием наносят навеску припоя дозированной массы 250 мг и дозированный объем флюса 0,01 мл. Включают нагреватель и устанавливают на заданном уровне температуру испытаний. Индуктивный преобразователь располагают на плоской заготовке припоя таким образом, чтобы игла фиксировала осевую симметрию преобразователя и заготовки припоя.

С помощью секундомера фиксируют начало и конец растекания капли припоя, определяют частоту по показаниям прибора и, применяя

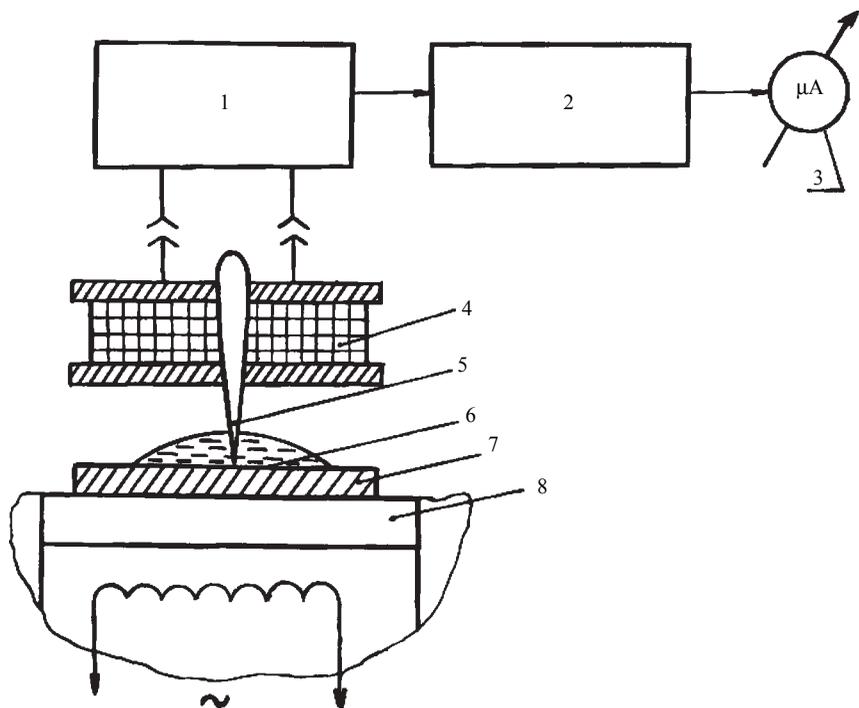


Рис. 5. 1. Схема прибора для измерения высоты капли растекшегося припоя

построенные для данного типа покрытия номограммы, находят высоту капли растекшегося припоя, а затем коэффициент растекания припоя.

Для повышения точности измерений, а также с целью исключения влияния температурного фактора в приборе используются два идентичных индуктивных преобразователя и два высокочастотных генератора. При этом осуществляется измерение разностной частоты, получаемой в дополнительном каскаде-смесителе. Балансная схема включения генератора позволяет компенсировать изменения частоты преобразователя в результате нагрева катушек индуктивности в процессе испытания.

Таким образом, может быть исследована паяемость гальванических покрытий, используемых для выводов интегральных схем: золота, серебра, палладия, олова, сплавов (олово-висмут, олово-никель, палладий-сурьма и палладий-индий). Результаты определения коэффициента растекания припоя ПОС61 при использовании спиртоканифольного флюса приведены в табл. 5.1.



Рис. 5.2. Факторы, определяющие смачиваемость и паяемость монтажного основания

Паяемость выводов интегральных микросхем

Тип покрытия	Состав, %	Условия испытаний	Коэффициент растекания припоя $K_{пр}$
Au	100 Au	ПОС61	0,91
Ag	100 Ag	$T = 493\text{K}$ ФКСп, $t = 10\text{ с}$	0,88
Pd-In	12 In, 88 Pd	$t = 15\text{ с}$	0,85
Pd	100 Pd	$t = 15\text{ с}$	0,80
Pd-Sb	5 Sb, 95 Pd	$t = 15\text{ с}$	0,78
Sn	100 Sn	$t = 15\text{ с}$	0,98
Sn-Bi	3 Bi, 97 Sn	$t = 15\text{ с}$	0,86
Sn-Ni	35 Ni, 65 Sn	$t = 15\text{ с}$	0,78
Sn-Ni	Блескообразователи	$t = 15\text{ с}$	0,82

Нарушения смачиваемости могут наблюдаться по всей ПП или только на отдельных местах пайки. Смачиваемость считается хорошей, если металлическая поверхность имеет равномерное, сплошное покрытие припоем, а на границе фаз “основное вещество-припой” образуется сплав. Процесс смачивания происходит в момент подвода припоя к чистой металлической поверхности при достаточной температуре.

Время воздействия флюса, температура и время пайки выбираются так, чтобы смачиваемость стала видимой. Качество смачиваемости обеспечивает паяемость, с другой стороны, паяемость определяется еще и рядом факторов, что показано на рис. 5.2.

6. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПАЙКИ

Все методы исследования процессов пайки в зависимости от решаемых задач можно свести в две укрупненные группы.

К *группе А* относятся исследования, имеющие целью сравнение различных методов пайки применительно к конкретному типу конструкции электронных узлов на ПП и выбор наиболее эффективного метода.

К *группе В* относятся исследования, которые преследуют цель нахождения оптимального соотношения величин параметров определенного процесса пайки для получения надежного паяного соединения с высокой степенью постоянства его характеристик.

Задачи группы А решаются, как правило, на организационно-технологическом уровне и основными параметрами сравнения здесь служат:

- производительность метода (точнее соответствующего оборудования);
- гибкость технологии;
- материало- и энергозатраты;
- стоимость оборудования и эксплуатационные затраты;
- показатели качества;
- экологические характеристики.

В качестве исходных данных для решения задач группы А используются:

- объем производства;
- номенклатура объектов производства;
- размеры партий;
- конструкторско-технологические характеристики объектов производства, отмеченные во введении.

Если в результате решения задачи А не выявлено существенного преимущества ни одного из рассматриваемых методов, можно продолжить исследования, решая задачу В для этих методов относительно одного критерия оценки.

Чтобы задача имела общую область решений (или единую шкалу оценок), необходимо выбрать факторы, определяющие или влияющие на данный критерий независимо от исследуемого метода. Однако как уже отмечалось ранее, качество пайки зависит от множества факторов, число и вид которых в значительной мере определяется конкретным методом пайки. Чтобы снять это противоречие, необходимо отобрать такие факторы, которые являются общими для всех исследуемых методов и в то же время влияют на параметр, служащий критерием сравнительной оценки.

Наиболее эффективный способ решения такого рода задач – применение моделирования. Рассматриваемые в данной работе системы моделирования позволяют решать следующие задачи оптимизации по критерию прочности паяных соединений:

- определение значения факторов, при которых критерий оптимизации получает максимальную величину;
- сравнительная оценка методов пайки по величине критерия оптимизации.

Задание 1

Прочность соединения при пайке волной припоя является функцией следующих параметров: скорости фонтанирования; скорости движения ПП относительно припоя; угла выхода ПП; температуры пайки.

На основании экспериментальных исследований получена зависимость выходного показателя Y технологического процесса от параметров x_1, x_2, x_3, x_4 . Она выражается функцией, включающей эффекты линейные, квадратические и парных воздействий:

$$Y = a_0 + \sum_{j=1}^4 a_j x_j + \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^4 a_{jk} x_j x_k - \sum_{j=1}^4 a_{jj} x_j^2.$$

Найти оптимальные значения параметров $x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*$ в области $-\infty < x_j < \infty$, при которых показатель Y достигает своего экстремального значения.

Используя необходимые условия экстремума, составляем систему алгебраических уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Psi(x^*)}{\partial x_1} &= 0, \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial \Psi(x^*)}{\partial x_n} &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Решение этой системы является оптимальным решением экстремальной задачи без ограничений в случае выполнения достаточных условий экстремума.

Варианты задания приведены в табл. 6.1.

Задание 2

Математическая модель технологического процесса лазерной пайки выражена уравнением регрессии для оценки механической прочности паяного соединения N . По заданному уравнению регрессии $Y_{\text{л}} = 0,5713 - 0,0863 x_1 + 0,0613 x_3 - 0,0563 x_4 - 0,1364 x_2 x_3$ определить оптимальные значения факторов x_1, x_2, x_3, x_4 , при которых параметр оптимизации N получает максимальное значение. В уравнении регрессии: $Y_{\text{л}}$ – выражает параметр оптимизации; N – механическую прочность паяного соединения; x_1, x_2, x_3, x_4 – кодированные значения факторов соответственно P, V, H, M (P – мощность лазерного излучения; V – скорость перемещения лазерного луча; H – высота пятна пайки; M – марка пасты – ПП1213). Рекомендуемые значения факторов: $P = 15-20$ Вт; $V = 6-8$ мм/с; $H = 0,25-0,45$ мм.

7. ОТКАЗЫ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Отказы паяных соединений делятся на *внезапные, параметрические и перемежающиеся*. По характеру проявления различают следующие отказы: явный обрыв, микроизлом, микроотслоения, видимая целостность цепи. Механизмы отказов рассмотрены в табл. 7.1.

Помимо этих основных видов механизмов зарождения отказов паяных соединений существует еще ряд явлений и процессов в структуре контакта: естественное старение материалов; образование в паяном соединении хрупких интерметаллических соединений; аллотропическое превращение олова при низких температурах и т.п.

Таблица 7.1

Механизм причинно-следственных зарождений отказов паяных соединений

Виды механизмов отказов паяных соединений	Причина возникновения отказа
Возникновение пор и трещин	Из-за выхода газов из монтажных оснований; поглощения влаги из воздуха; усадки припоя
Коррозия	Под воздействием различия электрохимических потенциалов материалов; под воздействием активных веществ
Непропай («холодная» пайка)	Вследствие неправильного температурного режима; несоблюдения временных режимов пайки или процесса кристаллизации припоя
Усталостное разрушение контактной пары	В результате термомеханических напряжений; из-за некачественной конструкции контактной пары

Очень большое влияние на получение качественного паяного соединения оказывает подготовка поверхностей конструктивных элементов контактной пары и соблюдение определенных технологических требований при пайке.

Признаками некачественной подготовки поверхности под пайку являются: низкая паяемость; несмачиваемость; недостаточное заполнение припоем паяльного зазора или пятна пайки; уменьшенное сцепление в зоне контакта; пониженная прочность соединения; искажение формы галтели припоя (выпуклость, острые кромки и выступы) и др.

Дефекты паяных соединений, причины их возникновения и меры предупреждения

Вид дефекта	Причины возникновения	Меры предупреждения
1. Припой не смачивает поверхность металла в зоне пайки	Недостаточный нагрев изделия под пайку	Повысить температуру пайки
	Наличие окисной пленки или других загрязнений	Проверить составы травителей и режимы обработки. При пайке в активных газовых средах проверить наличие среды
	Не обеспечено флюсование	Использовать более активный флюс или газовую среду, увеличить количество применяемых флюсующих средств
	Большая разность температур плавления припоя и флюса	Подобрать припой и флюс в соответствии с требованиями технологии пайки
	Не обеспечена оптимальная шероховатость поверхности	Обеспечить подготовку поверхности к облуживанию (механически, химически или другим способом)
	Припой не взаимодействует с паяемым металлом	Заменить состав припоя, повысить температуру пайки, нанести на паяемый материал технологическое покрытие
2. Припой не затекает в зазор при наличии хорошего смачивания	Увеличен или уменьшен зазор в сравнении с оптимальным	Подобрать оптимальный зазор и обеспечить его поддержание в процессе пайки
3. Не образуются галтели	Не выдержан оптимальный зазор, большая растворимость паяемого металла в припое	Изменить размер зазора до оптимального, поднять температуру пайки, увеличить количество припоя
	Не выдержан режим нагрева	Обеспечить равномерный прогрев всего изделия до оптимальной температуры
	Плохое качество очистки паяемой поверхности	Обеспечить более тщательную очистку поверхности перед пайкой, применить более активные флюсы или газовые среды
	Наличие углерода на поверхности изделий	Проверить полноту удаления маслосодержащих материалов на паяемых изделиях

Вид дефекта	Причины возникновения	Меры предупреждения
	Отсутствие выхода для газов из замкнутых полостей в зоне пайки	Сделать технологические отверстия
	Недостаточное количество припоя вследствие уноса при пайке связующим компонентом припоя	Использовать в качестве связующего паяльных паст полимеры, переходящие при нагреве из твердого состояния в газообразное (типа сополимера формальдегида с диаксоланом – СФД)
4. Пористость пятна пайки	Высокая температура нагрева или слишком продолжительный нагрев	Сократить время или снизить температуру пайки
	Несоответствие припоя	Подобрать припой, соответствующий металлу
	Испарение компонентов припоя в флюсе	Пайку вести в контролируемой среде при минимальных температуре и выдержке, применить способ нагрева, обеспечивающий сокращение времени нагрева
	Влияние флюса или контролируемых средств	Применить пайку в вакууме
	Проникновение газов в зону пайки из диэлектриков при пайке печатных плат	Проверить качество металлизации отверстий печатных плат (толщина покрытия должна быть не менее 25 мкм). Перед пайкой нагревать печатные платы с целью их дегазации. Повысить продолжительность пайки для удаления газообразных компонентов через расплав припоя
5. Осадки на поверхности печатных плат	Выпадение белого осадка связано с составом флюса, режимом пайки, качеством защитных покрытий	Удалить осадки сухой щеткой или промывкой водой
	Выпадение темного осадка вследствие неправильного выбора флюса или неполного удаления остатков флюса	Удалить остатки канифольного флюса сразу после пайки с помощью растворителей. Остатки кислотных флюсов удалить с применением нейтрализующих добавок
6. Трещины в паяном соединении	Быстрое охлаждение после пайки	Уменьшить скорость охлаждения. Использовать нагрев концентрированным источником энергии

Вид дефекта	Причины возникновения	Меры предупреждения
	Значительная разность характеристик паяемых материалов и припоя	Подобрать материалы с близкими характеристиками
	Пайка припоями с широким интервалом кристаллизации	Применить композитные материалы
	Образование хрупких фаз	Пересмотреть выбор припоя (режим пайки)
7. Трещины в зоне паяного соединения	Интенсивная диффузия припоя в основной металл	Снизить температуру пайки, сократить время нагрева
	Значительная разность характеристик паяемых материалов	Подобрать близкие по характеристикам материалы. Применить конструктивные и технологические приемы для обеспечения пайки различающихся по характеристикам материалов. Использовать концентрированные источники нагрева
8. Смещение и перекосы паяных соединений	Плохое крепление изделий перед пайкой	Использовать оснастку и приспособления, обеспечивающие надежную фиксацию изделия в процессе пайки
9. Некачественное состояние поверхности изделий после пайки	Окислительная среда в камере пайки	Обеспечить герметичность соединений трубопроводов, подающих защитную среду в камеру пайки. Создать избыточное давление в системе, подающей защитную среду в камеру пайки. Проверить состояние внутренней поверхности камеры пайки
	Наличие углерода на поверхности изделий	Проверить полноту удаления маслосодержащих материалов на паяемых изделиях
10. Наплывы или натеки припоя	Изделия недостаточно прогреты при пайке	Повысить температуру пайки в камере. При конвейерной пайке уменьшить скорость движения конвейера
	Наличие перемычек на печатных платах вследствие близкого расположения мест паяк	Использовать средства, изменяющие физические характеристики расплава припоя

Вид дефекта	Причины возникновения	Меры предупреждения
	В результате низкой температуры пайки, малой выдержки, несоответствия выбранного припоя, плохой смачиваемости поверхности припоем	Повысить температуру расплава, увеличить время контакта печатной платы с припоем. Применить механические средства для удаления избытка припоя
11. Шероховатая поверхность паяного соединения	Высокая температура или слишком продолжительный нагрев	Снизить температуру или сократить время нагрева
12. Нет электрического контакта в паяном соединении	Ложная пайка, отсутствие спая	Перепаять место соединения
13. Высокое электросопротивление термоэлемента	Пайка произошла не по всей поверхности контакта	Повторно облудить элементы контактирования и спаять их
14. Включения флюса в паяном соединении	Температура плавления припоя ниже температуры плавления флюса	Температура плавления флюса должна быть ниже температуры плавления припоя
	Заполнение паяного зазора происходит с двух сторон	Обеспечить одностороннее заполнение зазора припоем
	Удельный вес флюса больше удельного веса припоя	Подобрать соответствующий флюс
15. Шлаковые включения в шве	Некачественная подготовка поверхности соединяемых изделий перед пайкой	Обеспечить тщательную подготовку поверхности перед пайкой
	Излишняя продолжительность нагрева в процессе пайки	Выдержать режим пайки
	Использование пламени с избыточным содержанием кислорода	Отрегулировать пламя горелки
16. Локальная эрозия паяемого материала в зоне соединения	Повышенная растворимость материала в расплаве припоя	Использовать припой, не вызывающий эрозию, снизить количество вводимого припоя, уменьшить температуру и продолжительность пайки

Вид дефекта	Причины возникновения	Меры предупреждения
17. Непропай	Неправильное конструирование паяного соединения, наличие «глухих», не имеющих выхода полостей	Доработка конструкции паяного соединения
	Блокирование жидким припоем газа при наличии неравномерного зазора	То же. Доработать технологию
	Местное отсутствие смачивания жидким припоем поверхности	Меры предупреждения аналогичны дефекту 1
18. Деформация и коробление паяного соединения	Неравномерность нагрева и охлаждения изделия	Обеспечить равномерный нагрев и охлаждение изделия. Применить нагрев концентрированным источником тепла. Использовать оснастку, фиксирующую положение изделия при сборке, пайке и охлаждении

Часть этих признаков наблюдаются при краевом угле смачивания $\theta > 30^\circ$, коэффициенте растекания $K_p < 0,9$, времени смачивания более 4–5 с.

Более детально виды дефектов паяных соединений, причины их возникновения и меры предупреждения рассмотрены в табл. 7.2.

8. ПАЕМОСТЬ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ

Важнейшим фактором качественной паяемости является состав материала покрытия элементов контактной пары, особенно поверхностных слоев. Например, паяемость оловянно-свинцовых покрытий и припоев заметно снижается из-за наличия в них загрязнений (0,001–0,5%) элементами S, Cd, Zn, Al, Fe, Ni, Ag, Cu, Cl и др.

Паяемость практически всех материалов, применяемых в приборостроении, снижается из-за присутствия органических материалов, пыли и при окислении.

Основные типы загрязнений, связанных с изготовлением печатных плат, можно разбить на три группы.

Первую группу составляют твердые частицы, образовавшиеся при механической обработке и остатки растворов меднения. Даже очень малые количества этих веществ (например, меди – до 0,05 г/л), включаясь в покрытие и пассивируя его, заметно снижают паяемость.

Во *вторую группу* входят посторонние вещества, появляющиеся на катоде и в процессе гальванического осаждения в результате диффузии или конвекции. Они вызваны загрязнением анодов и электролитов остатками фоторезистов, краски, лаков, меди, посторонними микровключениями (Zn, Cd, Au). В результате подобных нарушений на покрытии появляется множество беспорядочно расположенных «островков», «мостиков», полос загрязнений.

Наибольшее влияние на ухудшение паяемости оказывают различные загрязнения и пассивирующие пленки, образующиеся после осаждения защитного покрытия, особенно при травлении и в процессе получения рисунка. Большинство защитных покрытий темнеет из-за образования соединений S, Cl, Fe, Cu. Для восстановления способности к пайке проводятся специальные операции осветления и оплавления.

К *третьей группе* относятся случайные загрязнения: остатками серы из раствора травителей; остатками катализаторов (Sn и Pb), применяемых перед химической металлизацией и при металлизации отверстий; остатками других химических реактивов (C, P, S, O).

Большое значение для качественной паяемости оловянно-свинцовых покрытий имеет однородность состава. Наилучшими свойствами обладает близкий к эвтектическому сплав из 60% олова и 40% свинца. При других соотношениях элементов повышается температура плавления, ухудшается растекаемость.

На паяемость тонких гальванических покрытий оказывают влияние такие факторы, как толщина, структура, пористость подложки и адгезия. При толщине внешнего покрытия менее 2–4 мкм образуется недостаточное для заполнения зазора количество жидкой фазы, что приводит к непроямам. С увеличением толщины до 10–12 мкм такие эффекты исчезают, а кривая прочности достигает максимума.

Верхний предел толщины оловянно-свинцового покрытия выбирается из условия быстрого его расплавления в процессе пайки, особенно автоматизированной. Оптимальной для данных покрытий считается толщина 15 мкм с обязательным оплавлением для повышения стойкости. Аналогичные результаты наблюдаются и для серебряных покрытий.

9. ОСОБЕННОСТИ ПАЙКИ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ОТВЕРСТИЙ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Качество паяных соединений элементов конструкций контактной пары в металлизированных отверстиях ПП зависит от наличия некоторых негативных явлений. Металлизация отверстий усложнена последствиями механической обработки (неровность стенок, засаливание их смолой и др.), необходимостью предварительной очистки и активирования основания ПП. Остатки стекловолокна и несплошная металлизация порождают рыхлую пористую структуру.

Следующим важным фактором является зазор между выводом компонента и стенкой отверстия. Зазор влияет на растекаемость припоя, кристаллическую структуру, химический состав паяного контакта и, как следствие, на прочность паяного соединения. Зазор должен быть достаточно мал для обеспечения условий капиллярного течения припоя и достаточно велик для создания теплового баланса, свободного затекания флюса и выхода газов, автоматизированной установки компонентов. Оптимальным считается зазор 0,3–0,4 мм для ПП толщиной 1–3 мм с отверстиями 0,6–1,2 мм при использовании припоев ПОС61 и ПОСК50-18 с различными канифольными флюсами.

Для качественной пайки, особенно автоматизированной, важно, чтобы расплавленный припой успел заполнить все отверстие до кристаллизации.

Улучшение паяемости отверстий достигается: посредством уменьшения шероховатости стенок после металлизации до $R_z = 10-20$; специальной подготовки диэлектрика перед и в процессе химического меднения; применения электролитов с хорошими рассеивающими и выравнивающими способностями; обеспечения толщины медного слоя 30–40 мкм, а защитного покрытия после травления 8–12 мкм; оптимизации ширины зазора. Улучшение механической обработки достигается применением высокоскоростного сверления твердосплавными сверлами из материалов типа ВК6М на специальных станках с ЧПУ, а также контролем износа инструмента. Во избежание «засаливания» стенок отверстия смолой подача сверла должна быть точно согласована с частотой вращения сверла.

10. КАЧЕСТВО ПАЙКИ ГРУППОВЫМИ МЕТОДАМИ

К групповым методам пайки ПП относятся пайка погружением (более десяти разновидностей) с неподвижным зеркалом припоя и пайка погружением с подвижным зеркалом припоя (волновой, каскадный, струйный методы) [1]. Наиболее распространен в мировой практике волновой метод пайки, который имеет разновидности по количеству создаваемых волн и их форме. По количеству волн различают установки с одинарной, двойной и тройной волнами. Наиболее благоприятным условием пайки является движение ПП навстречу припою с выдерживанием угла от 8 до 10° относительно волны припоя и дельта-образной формой волны.

Механизмы непропаев при серийном использовании групповых методов имеют существенные особенности. При длительном употреблении припоя в нем накапливаются растворимые вещества из ПП, навесных компонентов, осадки, загрязненность которыми не должна превышать определенных критических значений. Так, в припое не должно быть более $0,001-0,005\%$ S, Cd, Zn, Al, As (мышьяка); $0,02-0,05\%$ Fe, Ni, Au; $0,1-0,05\%$ Ag, Cu и некоторых других веществ. Ухудшают паяемость также: конденсаты масел, применяемых для защиты зеркала припоя; полимерные материалы типа клеев, красок, эпоксидов и т.п.; окалина, скапливающаяся на поверхности зеркала припоя и др.

В групповой пайке встречаются также непропаи из-за: коробления ПП; уменьшения уровня припоя в ванне; неправильного выбора волны и угла движения для конкретной конструкции ПП; малого прогрева ПП (неправильный выбор температуры и времени пайки); чрезмерного высушивания флюса и др.

Важным фактором обеспечения качественных паяных соединений при групповой пайке является эффективное флюсование. При групповом облуживании можно использовать флюсы с сильными агрессивными свойствами на основе неорганических кислот, так как ПП в дальнейшем подвергаются тщательной отмывке. Для групповой пайки рекомендуются активные органические и водорастворимые флюсы с применением бензолной, салициловой кислоты, сульфокислот, а также с добавками поверхностно-активных веществ. Последние уменьшают натяжение на границе «припой-флюс», улучшают динамику потока припоя, особенно на входе ПП в расплав – место, определяющее смачиваемость.

Выход из потока припоя определяет в значительной степени форму пятна пайки, влияет на возможность появления перемычек, сосулек. Недопустим резкий выход пятна пайки из волны припоя (неправильный угол выхода из волны).

Главное внимание должно быть уделено выбору температурно-временного режима групповой пайки, рекомендуемое графиком (рис. 10.1). Выбранный режим (по типу припоя) корректируется в зависимости от размера ПП, плотности точек пайки на ПП, толщины ПП и т.п.

Волновая пайка с применением припоя ПОС61 производится при температуре от 245 до 273 °С. Выбранная температура, как параметр сравнительно инерционный, поддерживается постоянной. Время пайки регулируется скоростью транспортирования ПП по конвейеру установки пайки волной. При скорости транспортирования от 0,5 до 3,0 м/мин время пайки изменяется в пределах от 1 до 7 с.

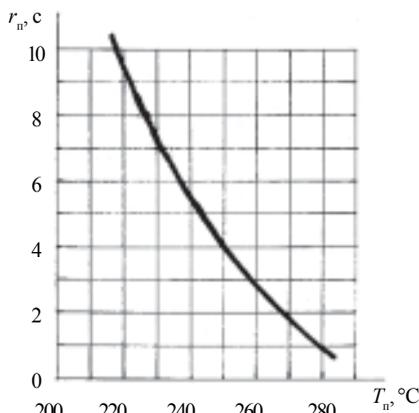


Рис. 10.1. Зависимость времени пайки от температуры пайки

11. КАЧЕСТВО ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

Технология поверхностного монтажа (ТПМ) в настоящее время является наиболее прогрессивным методом монтажа электронных узлов. Наиболее эффективно ее применение для узлов с высокой плотностью монтажа безвыводных малогабаритных компонентов с малыми размерами контактных площадок.

Паяные соединения на монтажном основании по ТПМ получают способом оплавления предварительно нанесенных припойных паст [2,3]. Для оплавления припойных паст используются инфракрасный (ИК) и конденсационный (парофазный) методы.

В образовании паяного соединения непосредственно участвуют: конструктивные элементы – ПМИЭТ (поверхностно-монтируемые изделия

электронной техники) и монтажные основания (МО); технологический материал (припойные пасты); технологические режимы (температурно-временные параметры процесса пайки). Все четыре составляющие могут рассматриваться как факторы, влияющие на качество паяных соединений.

Пайка инфракрасным излучением характеризуется высокой производительностью, инвариантностью к типу корпуса ПМИЭТ, экономичностью, отсутствием загрязнения среды. В оборудовании для ИК-пайки используется, в основном, нагрев через кварцевое стекло, пропускающее максимум излучения на длинах волн 0,8–5,0 мкм (ближний ИК-диапазон). В качестве излучателей используются кварцевые лампы, терморрадиационные панели, галогенокварцевые и ртутно-паровые лампы. С помощью различного расположения ламп и различных профилей отражателей излучение может быть сфокусированным (в виде полос шириной 6–20 мм) или рассеянным (охватывающим всю поверхность МО).

К недостаткам ИК-пайки следует отнести возможность перегрева ПМИЭТ, избирательность по отношению к материалу МО, трудность удаления остатков флюса.

Метод парофазной пайки, называемой иногда конденсационной, основан на использовании скрытой теплоты конденсации паров инертной термостойкой жидкости для нагрева паяемых изделий. Используемые жидкости не должны разлагаться при температуре кипения выше температуры расплавления припоев и не должны изменять свой состав. В современных установках наиболее часто в качестве парообразующих используются перфторуглеродные жидкости, полипаракилен. Парофазная пайка создает более щадящий режим для ПМИЭТ и МО, более равномерный нагрев до заданной температуры кипения пара, что гарантирует изделия от перегрева выше этой температуры. Изделия получаются чистыми, так как благодаря защитным свойствам пара окисления не происходит, а флюс, если и требуется, то в минимальных количествах. Флюс частично уносится парами, поэтому заключительная очистка осуществляется значительно проще.

К недостаткам парофазной пайки относится более низкая производительность, чем при ИК-пайке, сложность обеспечения процесса транспортирования изделия и циркуляции парообразующей жидкости без ее утечек в атмосферу. Существует проблема обеспечения безопасности персонала в связи с принципиальной возможностью образования, при определенных условиях, вредных выбросов.

Результаты сравнительного анализа ИК-пайки и конденсационной пайки представлены на рис. 11.1. Свойства припойных паст, их определяющие параметры рассмотрены в форме графовой модели выбора паст на рис. 11.2. Зависимость надежности паяного соединения от фак-



Рис. 11.1. Результаты сравнительного анализа методов пайки при поверхностном монтаже

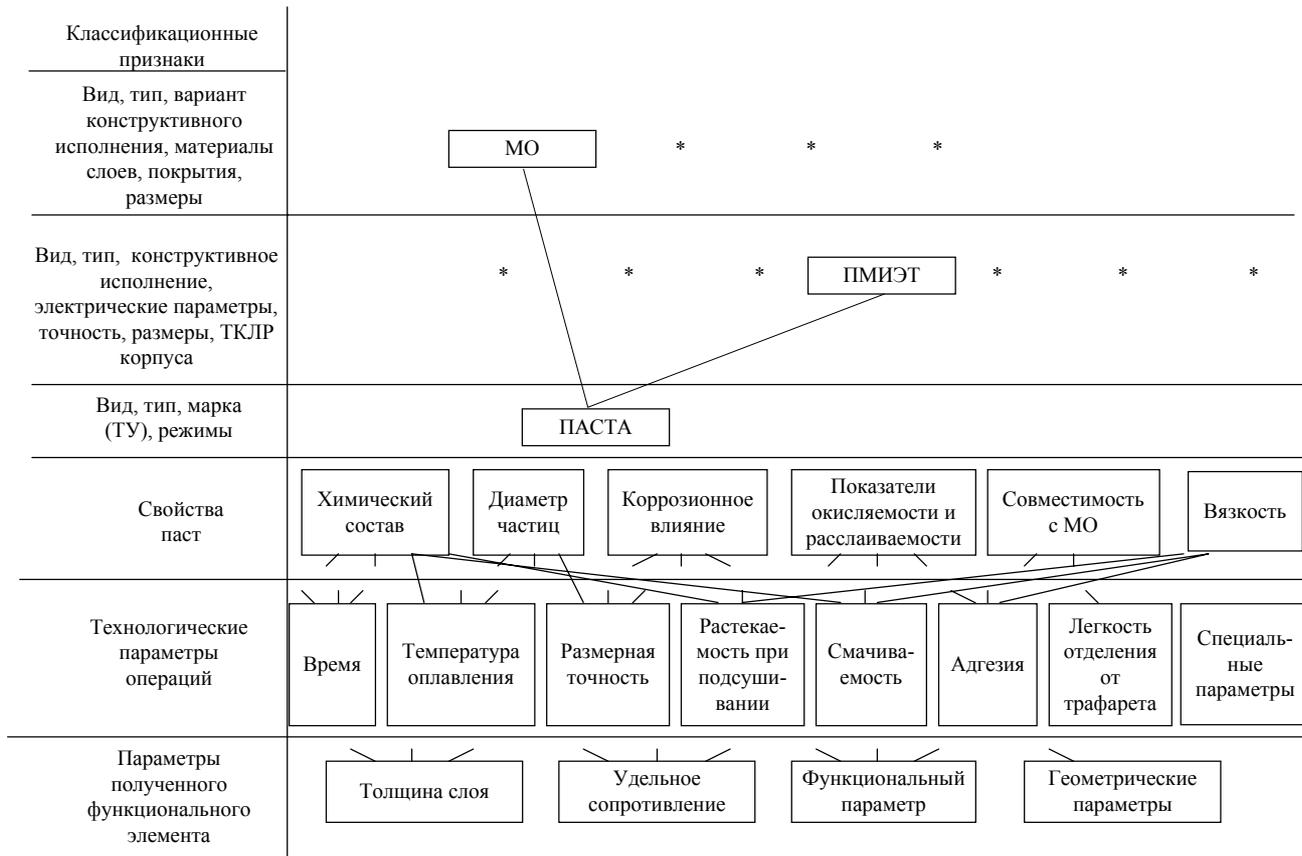


Рис.11.2. Графовая модель фрейма знаний выбора паст

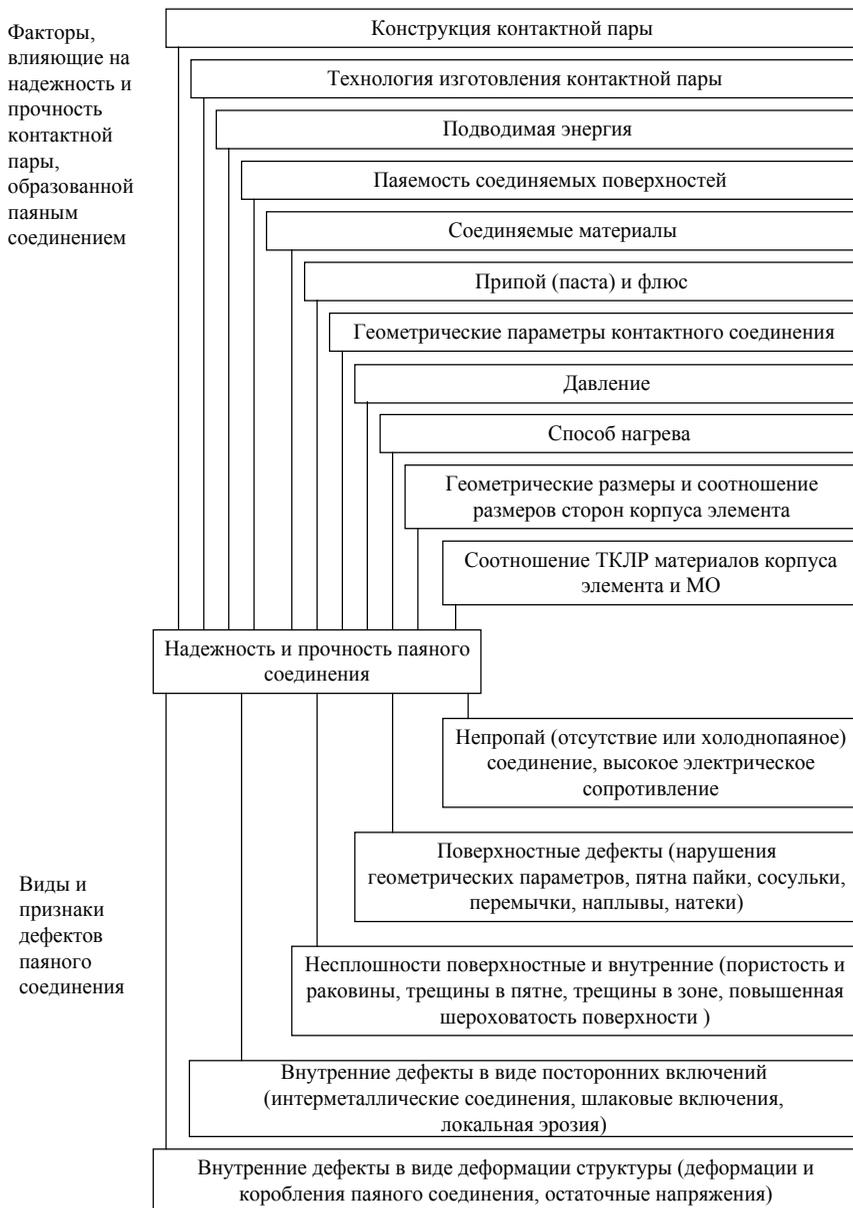


Рис. 11.3. Результаты анализа надежности паяного соединения оплавлением пасты

торов, влияющих на его качество, виды дефектов паяного соединения по ТПМ поясняются рис. 11.3.

12. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Широко применяемый в производстве 100%-й контроль по внешнему виду и электрическим параметрам, а также известные методы неразрушающего контроля (табл. 12.1–12.3) не дают гарантию полного выявления дефектов из-за возрастающей плотности монтажа, миниатюризации и особенностей корпусов ПМИЭТ, у которых частично, а иногда полностью (корпуса микросхем 61-го подтипа) паяные соединения закрыты корпусом.

Учитывая рассмотренные виды дефектов во всех предыдущих разделах, их физико-химическую природу, особенности процессов пайки и конструкций контактных паяных соединений, необходимо применять высокоразрешающие, локальные и чувствительные методы контроля. К этим методам, в первую очередь, относятся растровая микроскопия с рентгеновским микроанализом и электронная ОЖЕ-спектрометрия. В качестве дополнительных средств целесообразно использовать просвечивающую электронную микроскопию совместно с электронографией, рентгенографический и лазерный масс-спектрометрический анализы, позволяющие исследовать специально подготовленные объекты. Для уточнения места и характера дефекта рекомендуются методы неразрушающего контроля: рентгенотелевизионная и инфракрасная микроскопия; контроль цепей на малых напряжениях; измерение нелинейности вольтамперных характеристик и шумов. При контроле гальванопокрытий и паяных соединений применяются специальные методы измерения толщины, пористости, твердости, прочности и др. [4].

Некоторые из методов неразрушающего контроля рассмотрены в пособии [2] на примерах промышленных установок.

Таблица 12.1

Методы неразрушающего контроля для обнаружения внутренних дефектов в паяных соединениях по ГОСТ 24715-81

Вид контроля	Метод контроля	Характеристики метода		Область применения
		Чувствительность (минимальные размеры выявляемых дефектов)	Особенности метода	
Радиационный	Радиографический	2–5% от суммарной просвечиваемой толщины материала	Чувствительность зависит от толщины и марок соединяемых материалов и припоев. Необходима биологическая защита от ионизирующего излучения в соответствии с нормами радиационной безопасности и санитарными нормами	По ГОСТ 20426-82 для определения дефектов в ответственных изделиях
	Радиоскопический	3–8% от суммарной просвечиваемой толщины материала		
Акустический	Отраженного измерения (эхометод)		Выявляют дефекты типа непропаев. Определяют условные размеры дефекта, эквивалентную площадь, конфигурацию и число дефектов. Метод не гарантирует выявления одиночных пор, шлаковых и инородных включений диаметром 1–2 мм. Вид дефекта не определяется. Не выявляются дефекты, расположенные по глубине в мертвой зоне дефектоскопа, а также дефекты, расположенные от отраженной поверхности на расстоянии меньше, чем разрешающая способность дефектоскопа	Не ограничена. За исключением соединений, не имеющих доступа для ввода и приема ультразвуковых колебаний, и соединений, обладающих повышенным затуханием ультразвуковых колебаний или имеющих толщину меньше, чем мертвая зона дефектоскопа
	Прошедшего излучения	Дефекты площадью 1–15 мм ² при толщине материала		
	Резонансный	2,5–150 мм		
	Свободных колебаний	соответственно		
	Акустико-эмиссионный			

Вид контроля	Метод контроля	Характеристики метода		Область применения
		Чувствительность (минимальные размеры выявляемых дефектов)	Особенности метода	
Тепловой	Теплометрический	По ГОСТ 23483-79	Выявляют дефекты типа непропаев. Необходимо создание теплового потока в направлении, перпендикулярном поверхности соединения. Подготовка и проведение контроля по ГОСТ 23483-79. Соединения, у которых толщина слоя, обращенного к приемнику излучения, не превышает 33 мм. Возможен контроль паяных соединений, электрических схем и электрических цепей	
	Термометрический			
Электрический	Электрический	Определяется чувствительностью измерительной аппаратуры	Оценку качества производят по величине электрического сопротивления или электропроводности контролируемого участка. Вид и характер дефекта не определяется	Соединения, имеющие доступ для измерительных наконечников (щупов, зондов)

Примечания. 1. При радиографическом и радиоскопическом контроле не обеспечивается выявление дефектов:

– любых дефектов, если их протяженность в направлении излучения меньше удвоенной чувствительности контроля, определенной по эталонам чувствительности, или если изображения дефектов совпадают с другими изображениями, затрудняющими расшифровку (изображениями посторонних деталей, острых углов изделия, резких перепадов толщины паяемых элементов и т.п.);

– трещин с раскрытием менее 0,1 мкм;

– трещин, плоскость раскрытия которых не совпадает с направлением излучения;

– непропаев в случае, если разница между коэффициентами ослабления излучения припоя и паяемых материалов и толщина паяемого шва не обеспечивают достаточного радиационного контраста.

Радиографический и радиоскопический контроль следует применять при наличии двустороннего доступа к контролируемому паяному соединению, обеспечивающего возможность установки источника и детектора излучения в соответствии со схемами контроля.

2. Размеры фактически выявляемых дефектов зависят от технологических характеристик применяемых средств контроля, конструктивных особенностей изделия и технологии изготовления.

Таблица 12.2

Методы неразрушающего контроля для обнаружения сквозных дефектов в паяных соединениях по ГОСТ 24715-81

Вид контроля	Метод контроля		Характеристики метода		Область применения
			Порог чувствительности теческателя, м ³ ·Па/с	Особенности метода	
Проникающими веществами теческа-ния	Газовые	Радиоактивный	–	Порог чувствительности испытаний зависит от технических характеристик применяемых средств контроля, конструктивных особенностей контролируемых изделий и технологии контроля. Требование к выбору методов испытаний, к подготовке и проведению испытаний – по ГОСТ 24054-80	Определение герметичности изделий и (или их элементов), а также выявление отдельных течей
		Манометрический	–		
		Масс-спектрометрический	Способы вакуумной камеры, накопления при атмосферном давлении, опрессовки в камере, опрессовки замкнутых оболочек, обдува $5 \cdot 10^{-11} - 5 \cdot 10^{-13}$		
		Галогенный	10^{-7}		
		Пузырьковый	–		
		Ультразвуковой	$10^{-3} - 10^{-2}$		
		Катарометрический	10^{-6}		
		Химический	–		
		Инфракрасный	10^{-6}		
	Жидкостный	Гидростатический	–		
		Люминесцентный (цветной)	–		
		Электрический	–		

Методы неразрушающего контроля для обнаружения поверхностных дефектов в паяных соединениях по ГОСТ 24715-81

Вид контроля	Метод контроля	Характеристики метода		Область применения
		Чувствительность (минимальные размеры выявляемых дефектов)	Особенности метода	
Оптический	Визуальный	По ГОСТ 23479-79	Для обнаружения мелких дефектов величиной менее 0,1 мм используют оптические приборы с увеличением до 30 крат. Подготовка и проведение контроля по ГОСТ 23479-79	Соединения, имеющие доступные для осмотра поверхности
	Визуально-оптический			
Проникающими веществами, капиллярный	Цветной	По ГОСТ 18442-80	Достоверность метода зависит от шероховатости контролируемой поверхности паяного соединения. Проведение контроля по ГОСТ 18442-80	Соединения, имеющие поверхности, доступные для нанесения пенетрантов и осмотра
	Люминесцентный			
	Люминесцентно-цветной			
Вихретоковый	Трансформаторный	Дефекты с раскрытием 0,0005–0,001 мм и глубиной $\geq 0,2$ мм	Параметр шероховатости поверхности контролируемых соединений $R_z \leq 40$ мкм. Одновременно с поверхностными дефектами выявляют дефекты, расположенные на глубине до 2 мм от поверхности	Соединения, имеющие поверхности, доступные для преобразователей дефектоскопов
	Параметрический			

Примечание. Размеры фактически выявляемых дефектов зависят от технических характеристик, применяемых средств контроля, конструктивных особенностей изделий и технологии изготовления.

Библиографический список

1. Ханке Х.-И., Фабиан Х. Технология производства радиоэлектронной аппаратуры: Пер. с нем./ Под ред. В. Н. Черняева. М.: Энергия. 1980. 464 с.
2. Аникин А. Д., Ларин В. П., Поповская Я. А. Технология приборостроения. Проектирование сборочно-монтажных процессов приборостроительного производства: Учеб. пособие/ЛИАП. Л., 1990. 83 с.
3. Технология поверхностного монтажа: Обзорная информация // Приборы, средства автоматизации и системы управления. Сер. ТС-9 “Технология приборостроения”. Вып.5. М.: Информприбор, 1980. 48 с.
4. Технология технического контроля в машиностроении: Справочное пособие / Под общ. ред. В. Н. Чупырина. М.: Изд-во стандартов, 1990. 400 с.

Оглавление

Введение	3
1. Физические основы получения паяного соединения	4
2. Условия получения качественного паяного соединения	5
3. Характеристики процесса пайки	9
4. Качество паяного соединения	14
5. Методы исследования паяных соединений	16
6. Методы исследования процессов пайки	19
7. Отказы паяных соединений	22
8. Паяемость в зависимости от свойств покрытий	27
9. Особенности пайки металлизированных отверстий печатных плат	29
10. Качество пайки групповыми методами	30
11. Качество паяных соединений, выполненных по технологии поверхностного монтажа	31
12. Контроль качества паяных соединений	36
Библиографический список	41

Учебное издание

Ларин Валерий Павлович

ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ.
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ ПАЙКИ И
ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Учебное пособие

Редактор *В. П. Зуева*
Компьютерная верстка *М. А. Даниловой*

Сдано в набор 26.08.02. Подписано в печать 29.10.02. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,44. Усл. кр.-отг. 2,75. Уч. -изд. л. 2,5. Тираж 200 экз. Заказ №

Редакционно-издательский отдел
Отдел электронных публикаций и библиографии библиотеки
Отдел оперативной полиграфии
СПбГУАП

190000, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67