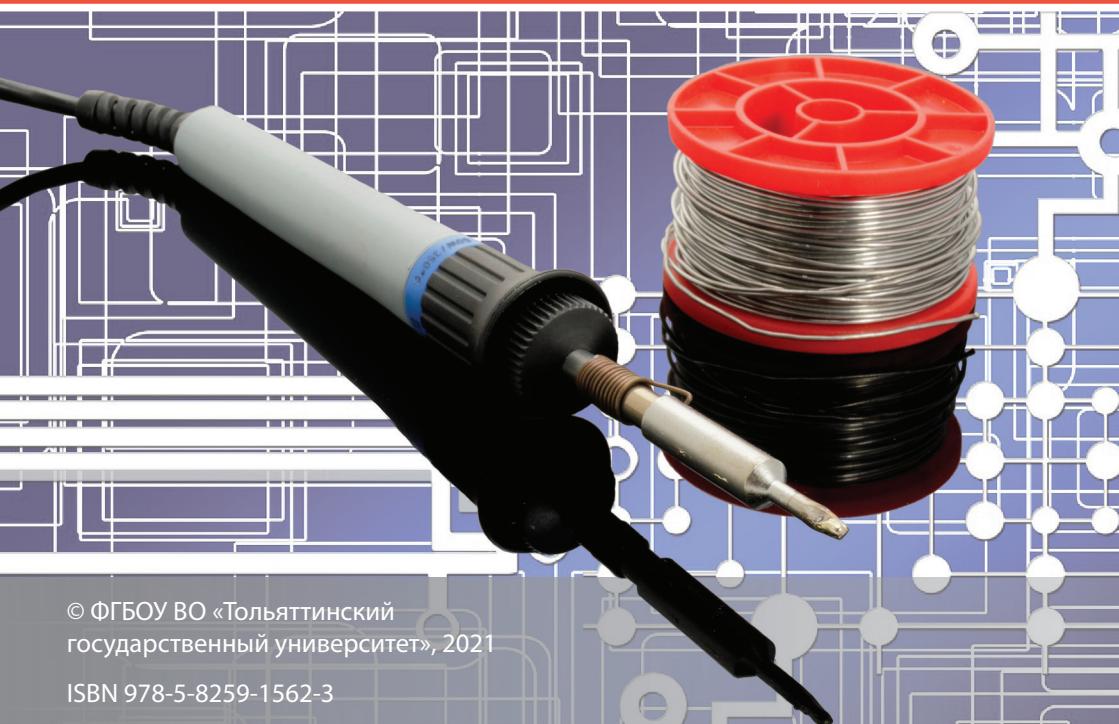


Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Институт машиностроения

А. Л. Федоров

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ

Электронное учебное пособие



© ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2021

ISBN 978-5-8259-1562-3

Рецензенты:

канд. техн. наук, заместитель руководителя

АЦСП ООО «ССДЦ «Дельта» *О.В. Шашкин*;

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Сварка, обработка
материалов давлением и родственные процессы»

Тольяттинского государственного университета *А.Ю. Краснопевцев*.

Федоров, А.Л. Технология и оборудование низкотемпературной пайки : электронное учебное пособие / А.Л. Федоров. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2021. – 1 оптический диск. – ISBN 978-5-8259-1562-3.

В учебном пособии изложены особенности низкотемпературной пайки, рассмотрены применяемые системы припоев и оборудование.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 15.03.01 «Машиностроение» (направленность (профиль) «Современные технологические процессы изготовления деталей в машиностроении») очной и заочной форм обучения высшего образования.

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8; PIII 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

Редактор *Е.А. Держаева*
Корректор *Е.В. Ахмадулина*
Технический редактор *Н.П. Крюкова*
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*
Художественное оформление,
компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

Дата подписания к использованию 02.02.2021.

Объем издания 11,6 Мб.

Комплектация издания: компакт-диск,
первичная упаковка.

Заказ № 1-54-19.

Издательство Тольяттинского
государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. 8 (8482) 53-91-47, www.tltsu.ru

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРИПОЕВ	7
1.1. Висмутовые и галлиевые припои	8
1.2. Припои на основе олова	14
1.3. Свинцовые припои	17
1.4. Индивидуальные, цинковые и кадмиевые припои	22
Контрольные вопросы	33
2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПАЙКИ	34
2.1. Газопламенный нагрев	34
2.2. Пайка паяльником	38
2.3. Пайка в печах	52
2.4. Оборудование для пайки волной припоя	71
2.5. Паяльные станции	83
Контрольные вопросы	104
3. ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПРИПОЯМИ	105
3.1. Пайка медных сплавов	105
3.2. Пайка сталей и сплавов	107
3.3. Пайка алюминиевых сплавов	109
3.4. Пайка печатных плат	112
Контрольные вопросы	121
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	122
ГЛОССАРИЙ	126

ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие микроэлектроники в последние годы совершенно преобразило мир. Современная микроэлектронная аппаратура характеризуется высокой степенью сложности и высокими требованиями по качеству и надежности. В настоящее время для получения электрических соединений компонентов микроэлектроники в такой аппаратуре применяется пайка.

Популярность пайки в сборочно-монтажном производстве объясняется ее высокой технологичностью. Пайка оловянно-свинцовыми припоями осуществляется в воздушной среде с применением флюсов, обеспечивает хорошее смачивание паяемых металлов, отличается относительно невысокой температурой пайки ($190\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$), обеспечивает хороший электрический контакт, допускает возможность многократной перепайки. Это позволяет производить замену электрорадиоэлементов при обнаружении неисправностей во время наладки аппаратуры и ее эксплуатации на объекте.

Поскольку для самих печатных плат и компонентов, монтируемых на них, нагрев до высокой температуры является недопустимым, применение нашла преимущественно низкотемпературная пайка.

Появление все новых поколений элементной базы микроэлектроники привело к изменениям в конструкции печатных плат. В частности, от монтажа компонентов в отверстия (PTH – Plated Through Hole) все шире переходят к технологии поверхностного монтажа (SMT – Surface Mount Technology). К преимуществам здесь следует отнести следующее: не требуется сверление отверстий в плате, малые габариты и вес компонентов, легкость автоматизации производства.

Для низкотемпературной пайки плат могут быть применены разные по химическому составу и свойствам припой. Для нагрева до температуры пайки в настоящее время помимо традиционного паяльника и волны припоя разработаны и внедряются другие способы: в парогазовой фазе, в инфракрасных лучах, в печах при конвекционном нагреве. В условиях мелкосерийного производства и при ремонтных работах применяют паяльники. Однако в настоящее время паяльники, как правило, входят в состав паяльных станций, также представляющих из себя комплекс оборудования.

Цель данного пособия – обеспечить формирование профессиональных компетенций, предусмотренных федеральным государственным образовательным стандартом для программ подготовки по направлению 15.03.01 «Машиностроение», а именно:

- умения использовать стандартные средства автоматизации проектирования деталей и узлов машиностроительных конструкций в соответствии с техническими заданиями;
- способности разрабатывать технологическую и производственную документацию с использованием современных инструментальных средств;
- способности обеспечивать техническое оснащение рабочих мест с размещением технологического оборудования; умения осваивать вводимое оборудование;
- умения выбирать основные и вспомогательные материалы и способы реализации основных технологических процессов и применять прогрессивные методы эксплуатации технологического оборудования при изготовлении изделий машиностроения.

Задачи учебного пособия:

- дать информацию о присадочных материалах и оборудовании для низкотемпературной пайки;
- сформировать навыки анализа паяных узлов для выбора присадочных материалов и разработки технологии их низкотемпературной пайки.

1. ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРИПОЕВ

Для получения низкотемпературных припоев применяют, как правило, легкоплавкие металлы – ртуть ($t_{\text{пл}} = 38,87^{\circ}\text{C}$), галлий ($t_{\text{пл}} = 29,78^{\circ}\text{C}$), индий ($t_{\text{пл}} = 156,4^{\circ}\text{C}$), олово ($t_{\text{пл}} = 231,9^{\circ}\text{C}$), висмут ($t_{\text{пл}} = 271,3^{\circ}\text{C}$), свинец ($t_{\text{пл}} = 327^{\circ}\text{C}$), кадмий ($t_{\text{пл}} = 321^{\circ}\text{C}$), цинк ($t_{\text{пл}} = 419^{\circ}\text{C}$). Используя перечисленные металлы, можно получать как особолегкоплавкие припои – с температурой ликвидуса в интервале $39\text{--}145^{\circ}\text{C}$, так и легкоплавкие припои – с температурой ликвидуса в пределах $145\text{--}450^{\circ}\text{C}$.

Особолегкоплавкие припои применяют в случаях, когда опасен перегрев паяемого материала или материала деталей изделия, не подвергаемых пайке, но испытывающих нагрев при термическом цикле пайки, или при ступенчатой (повторной) пайке.

Такие припои нашли особенно широкое применение в электронике, электротехнике, в частности при изготовлении приборов противопожарного назначения.

Легирование данных припоев производят с целью повышения их прочности, хладостойкости, снижения электросопротивления и токсичности, снижения температурного коэффициента линейного расширения (особенно предназначенных для пайки монтажа ЭВМ и счетных машин), сообщения припою магнитных свойств, необходимых при пайке магнитных и электромагнитных приборов, средств автоматизации.

Важной задачей легирования является повышение коррозионной стойкости соединений меди, паянной свинцовыми припоями, и алюминия, паянного оловянными припоями. Для особолегкоплавких и легкоплавких припоев большое значение имеет возможность варьирования шириной их интервала затвердевания с целью устранения усадочной пористости в паяных швах, а также повышения содержания первичных кристаллов с целью проведения абразивного лужения паяемых сплавов. Для припоев, слабо взаимодействующих с паяемым металлом, выполняется легирование с целью улучшения такого взаимодействия.

1.1. Висмутовые и галлиевые припои

Плотность висмута — 9,8 г/см³. Висмут обладает низкой пластичностью, поэтому его редко применяют для пайки металлов и сплавов. Однако при температуре 150–250 °С он проявляет пластические свойства. Сплавы, богатые висмутом, используют в качестве особолегкоплавких припоев. В качестве легирующих компонентов в такие сплавы вводят в основном Sn, Cd, Pb, In, Zn. Температура начала плавления таких припоев находится в интервале 46,7–144 °С.

Висмут — достаточно дорогой металл. Стоимость килограмма висмута варьируется в пределах 3000–4000 рублей.

Переход висмута из жидкого в твердое состояние сопровождается увеличением объема на 3,3 %. Поэтому для припоев, богатых висмутом, характерно увеличение объема при переходе из жидкого состояния в твердое, а также при охлаждении после затвердевания. Припои с висмутом слабо смачивают некоторые металлы, например железо, конструкционные стали, и отличаются сравнительно высоким электросопротивлением и низкими механическими свойствами. Для улучшения смачиваемости висмутовыми припоями эти металлы перед пайкой оцинковывают и лудят оловянно-свинцовым припоеем. Висмутовые припои применяют чаще всего для пайки меди.

Для улучшения способности к смачиванию и сцеплению с паяемым металлом (меди) в висмутовые припои вводят до 0,5–5 % железа, никеля, кобальта, платины, иридия, рутения, осмия, рения, палладия, золота.

Для усиления эффекта увеличения объема висмутового припоя при затвердевании с целью устранения течей в емкостях вводят германий, кремний, галлий. Добавка до 0,5 % Ge в такие припои к тому же упрочняет их.

Применение в практике пайки нашли особолегкоплавкие сплавы эвтектического состава, содержащие висмут, свинец, олово, кадмий, с температурой плавления ниже 150 °С.

Использование легкоплавких припоев, таких как эвтектика Bi – Sn вместо Sn – Pb, позволяет исключить из шва свинец и существенно снизить тепловые напряжения в изделиях. Диаграмма состояния висмут – олово отражена на рис. 1.1. Пайка эвтектическим составом с бесканифольным флюсом возможна при 170 °С.

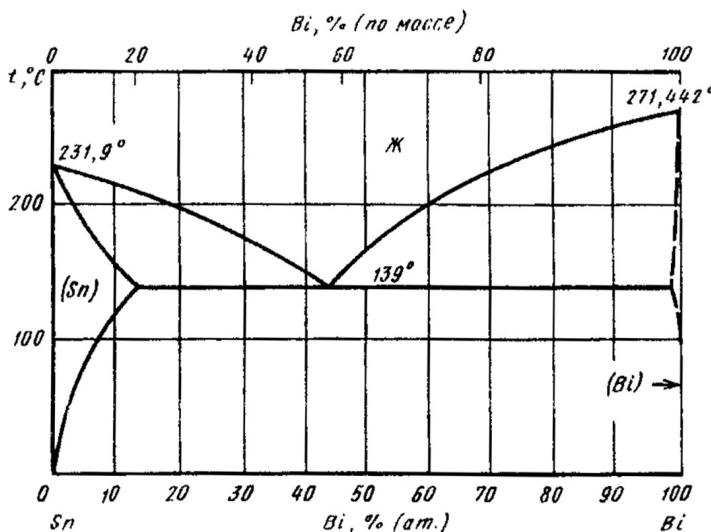


Рис. 1.1. Диаграмма состояния Bi – Sn [20]

Временное сопротивление разрыву соединений из меди, паянных висмутовыми припоями, низкое, чуть более 10 МПа.

Висмут образует с алюминием диаграмму состояния монотектического типа, рис. 1.2. Предельная его растворимость в алюминии при температуре 657 °C составляет менее 0,2 %. Растворимость алюминия в висмуте при температуре 250 °C ничтожна. Поэтому соединения из алюминия, паянные висмутовыми припоями, обладают склонностью к щелевой коррозии. Для повышения коррозионной стойкости паянных соединений из алюминия и его сплавов в висмутовые припои вводят 1–10 % Zn. Припой такого типа имеет, например, состав (%): (40–60) Bi – (8–25) Pb – (7–25) Sn – 15 Cd – (1–10) Zn [5].

В электронике используют висмутовые припои для пайки деталей из меди, латуни, никеля, свинца состава: Bi – 22 % Sn – 28 % Pb ($t_{\text{пл}} = 100$ °C) и Bi – 43 % Sn ($t_{\text{пл}} = 139$ °C). Введение висмута в припой Zn – (65–70) % Sn – (3–9) % Bi с температурой плавления 330–370 °C позволяет применять его для пайки ферритов вместо токсичного припоя Zn – Cd.

При достаточной ширине интервала затвердевания висмутовых припоеев при введении в них цинка и германия возможен процесс абразивно-кавитационной пайки алюминиевых сплавов.

Сплав на основе висмута состава 50 % Bi – 25 % Pb – 12,5 % Sn – 12,5 % Cd называется сплавом Вуда. Температура его полного расплавления равна 60 °C.

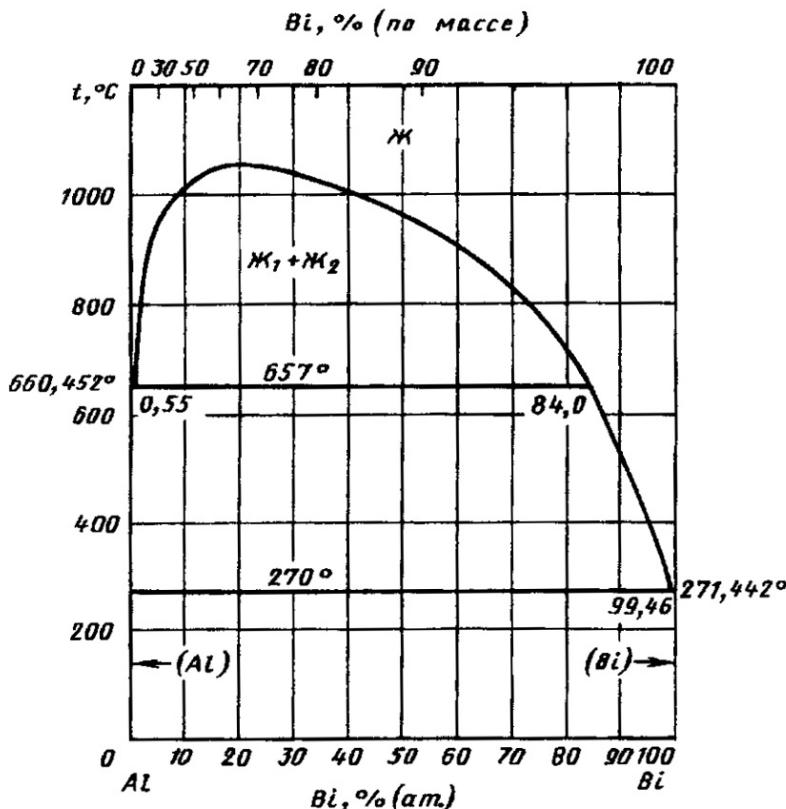


Рис. 1.2. Диаграмма состояния Al – Bi [20]

Плотность галлия в твердом состоянии при температуре 20 °C равна 5,904 г/см³, жидкий галлий ($t_{пл} = 29,8$ °C) имеет плотность 6,095 г/см³, то есть при затвердевании объем галлия увеличивается. Кипит галлий при 2230 °C. Одной из особенностей галлия является широкий температурный интервал существования жидкого состояния (от 30 и до 2230 °C).

Низкая температура плавления и хорошая смачивающая способность галлия служат основанием для использования его в качестве

компонентом припоев. Для галлия характерным является высокая проникающая способность по границам зерен некоторых металлов, особенно легкоплавких – олова, кадмия, свинца, цинка, а при нормальных температурах – и по границам алюминия с образованием легкоплавкой эвтектики, что связано с его малой растворимостью в этих металлах при температуре 20 °С. После лужения галлием алюминий при температурах менее 120 °С становится хрупким и непрочным за счет образования по границам его зерен особолегкоплавкой эвтектики, богатой галлием, с температурой плавления ниже 29,7 °С. Кроме того, смачивание алюминия пленкой жидкого галлия вызывает его стремительное окисление. Выше температуры 120 °С галлий образует с алюминием сравнительно широкую область твердых растворов и при достаточной выдержке способен диффундировать с границ зерен внутрь их, что приводит к полному или частичному восстановлению пластичности и прочности паяемого металла.

Галлий в качестве основы полностью расплавляемых припоев применяют редко. Галлиевые припои используют для диффузионной пайки меди. Чистый галлий применяют для диффузионной пайки алюминиевых сплавов. Особенностью галлиевых припоев является то, что, затвердевая при низкой температуре, они сохраняют свои свойства и при более высокой температуре. Время затвердевания припоев зависит от состава сплава и составляет от нескольких минут до нескольких часов. Применяют галлиевые припои для пайки чувствительных к нагреву микроэлементов в электронике, для соединения драгоценных камней.

Чаще применяют галлиевые пасты. Они позволяют собирать изделия под пайку с большими зазорами, что важно для типов соединений с замкнутыми паяными швами, например телескопических, когда затруднен прижим соединяемых деталей, а сборка с капиллярными зазорами существенно удорожает процесс.

Наполнителем галлиевых паст – припоев служат тонкодисперсные порошки, главным образом меди, серебра, никеля. Для улучшения свойств легкоплавкой составляющей паст в галлий добавляют индий, олово. Диаграмма состояния Ga – In на рис. 1.3. Температура плавления эвтектики Ga – 14,2 % In составляет 15,3 °С. Припой состава (70–50 %) In и (30–50 %) Ga применяют для бесфлюсовой

пайки меди в печах с контролируемой атмосферой при температуре 800–940 °C в течение 1,5–2 часов. При указанных условиях вследствие диффузии легкоплавких компонентов в медь образуются твердые растворы меди и галлия, меди и индия.

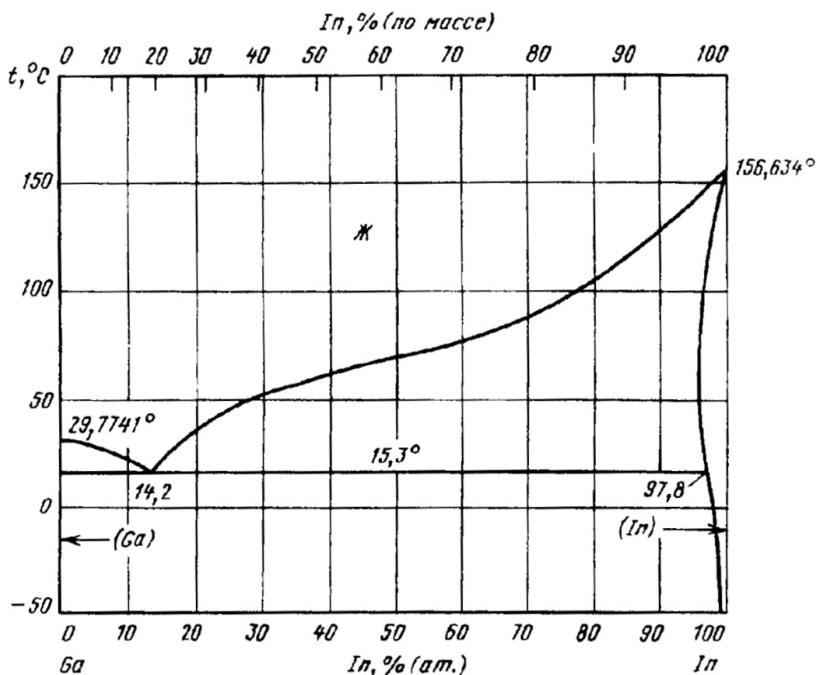


Рис. 1.3. Диаграмма состояния Ga – In [20]

Диаграмма состояния Ga – Sn показана на рис. 1.4. Температура плавления эвтектики Ga – 8,5 % Sn составляет 20,5 °C.

Эвтектические сплавы галлия с цинком и таллием также имеют температуру плавления ниже 30 °C.

Дисперсность наполнителя галлиевых паст обычно составляет 35–71 мкм. Припой состава 60 % Ga – 10 % In – 30 % Cu (меди в качестве наполнителя) может быть применен для пайки деталей электровакуумных приборов, работающих при нагреве до 850–1040 °C без нарушения вакуумной плотности.

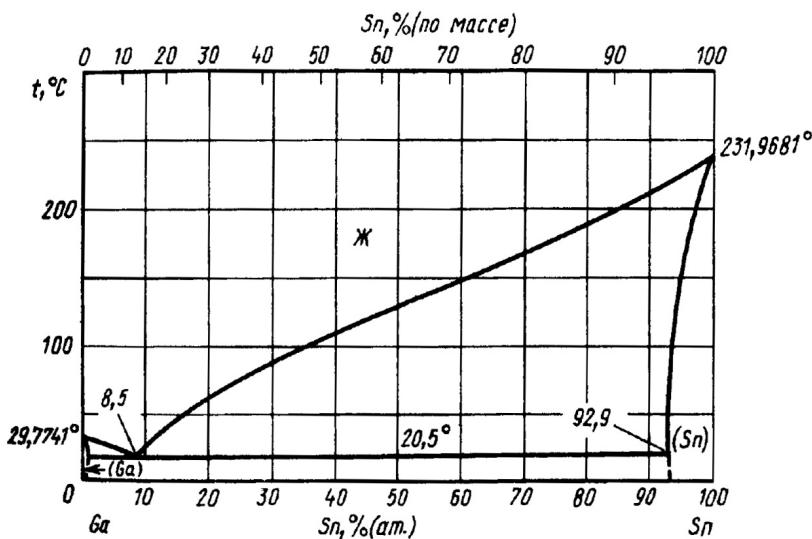


Рис. 1.4. Диаграмма состояния Ga – Sn [20]

Припой состава (4–5 %) Sn – (39–50 %) Cu – (46–56 %) Ga может быть использован для холодно-дисперсионной пайки электротехнических изделий, в основном малогабаритных проволочных потенциометров с выводами. Для приготовления данного припоя в течение получаса в жидким галлии растворяют навеску олова при температуре 50–70 °C. Затем в расплаве при 35–45 °C перемешивают медный порошок. Полученный состав следует использовать сразу после приготовления.

Некоторые двойные сплавы галлия с медью, серебром, золотом, магнием, титаном, никелем, кобальтом могут быть пригодны в качестве припоев для диффузионной пайки титана, меди, ряда металлов и их сплавов вследствие образования с галлием широкой области твердых растворов.

Для галлия и галлиевых паст характерно интенсивное окисление при нагреве на воздухе до температур свыше 400 °C. При этом они превращаются в темную порошкообразную массу. Поэтому пайку галлиевыми пастами при температурах свыше 400 °C необходимо вести в вакууме ($p = 1,33 \cdot 10^{-2}$ Па).

Для предотвращения коробления и растрескивания кристаллов в силовых полупроводниковых приборах и для повышения циклической прочности

ческой прочности приборов в режимах «включено – выключено» нашел применение припой, состоящий из галлия и олова (до 60 % Ga).

1.2. Припои на основе олова

Плотность олова в твердом состоянии при 20 °C составляет 7,3 г/см³. В жидкоком состоянии плотность олова при температуре плавления – 6,98 г/см³. Температура плавления олова – 231,9 °C и кипения – 2600 °C.

Олово и его сплавы, содержащие ≥50 % Sn, имеют температуру ликвидуса в интервале 145–250 °C. Основу таких припоев составляют четыре тройных и три двойных эвтектики, богатые оловом. Например, припой: 49,8 % Sn – 32 % Pb – 18,2 % Cd; 67,8 % Sn – 32,2 % Cd; 61,9 % Sn – 38,1 % Pb; 71 % Sn – 24 % Pb – 5 % Zn; 88,1 % Sn – 10,4 % Zn – 1,5 % Al. Почти все эвтектики этих систем состоят из фаз на основе твердых растворов элементов, за исключением сплавов системы Sn – Pb – Cd.

Свойства легкоплавких припоев во многом зависят от свойств одной из основных фаз – твердого раствора олова. Олово имеет две полиморфные модификации: 1) белое, с тетрагональной кристаллической структурой, устойчивой до температуры 13,2 °C, с плотностью 7,28 г/см³; 2) серое, с кубической структурой типа алмаза, образующееся при низких температурах, с плотностью 5,82 г/см³. Превращение белого олова в серое происходит с выделением теплоты и сопровождается большим изменением объема, что вызывает его разрушение и образование серого порошка («оловянная чума»). Скорость превращения белого олова в серое при температуре 13,2 °C благодаря способности его к переохлаждению мала, она максимальна при –30...–50 °C и уменьшается при дальнейшем снижении температуры.

Белое олово (β -Sn) обладает хладноломкостью при –30...–60 °C; вязкое разрушение переходит в хрупкое при ударных испытаниях. В припое ПОС 30, где оловянной фазы меньше, чем в припое ПОС 40, температурный интервал перехода из вязкого в хрупкое состояние расширяется, а ударная вязкость снижается более плавно.

Пластичность олова повышается в интервале температур от 17 °C до –30 °C, после чего начинает резко снижаться.

Превращение белого олова в серое ускоряется при наличии зародышей серого олова, напряжений в деталях, коррозионно-активной среды, некоторых примесей, повторных нагревов и охлаждения. Известны случаи разрушения при низких температурах в холодильных установках полуды и деталей из чистого олова.

Алюминий, цинк, германий, медь, железо, кобальт, марганец и магний ускоряют распад белого олова; висмут, сурьма, свинец, кадмий, серебро, индий, золото и никель задерживают. При наличии в олове 0,3–0,5 % Bi, или 0,5 % Sb, или 1 % Pb распад олова становится практически невозможным.

Введение в оловянные припои меди, никеля, магния и цинка повышает их прочность, висмута и цинка — увеличивает их смачивающую способность и легкоплавкость, кроме того, добавки магния, образующего химические соединения с Sn и Pb, упрочняют припой.

Представляют интерес для пайки компонентов микроэлектроники сплавы с использованием Zn и Bi. Например, припой 89 % Sn — 8 % Zn — 3 % Bi имеет температуру солидуса 191 °C и ликвидуса 198 °C. Однако цинк — активный металл, что приводит к относительно малому времени хранения припойной пасты, чрезмерному шлакованию и оксидированию при пайке. Кроме того, это может привести к возникновению коррозии в печатном узле. Висмут существенно увеличивает текучесть сплава в расплавленном состоянии, что приводит к значительному росту числа перемычек.

В оловянно-свинцовых припоях и в паянных ими соединениях «оловянная чума» даже при работе соединений при низких температурах не наблюдалась.

Легкоплавкие припои, богатые оловом, представлены среди тройных сплавов эвтектической системы Sn — Pb — Cd. Наиболее распространенные припои содержат эвтектику Sn — Pb с температурой плавления 183 °C. Диаграмма состояния олово — свинец представлена на рис. 1.5.

Сурьма уменьшает окисление оловянно-свинцовых припоев в жидком состоянии, улучшает их внешний вид и увеличивает теплостойкость до температуры немного выше 100 °C.

Основной набор стандартных оловянно-свинцовых припоев в разных странах примерно одинаков. Они различаются по содер-

жанию примесей и сурьмы, упрочняющей эти припои, содержание которой не превышает 6 %, так как при большем ее количестве образуется химическое соединение SnSb, охрупчивающее припой.

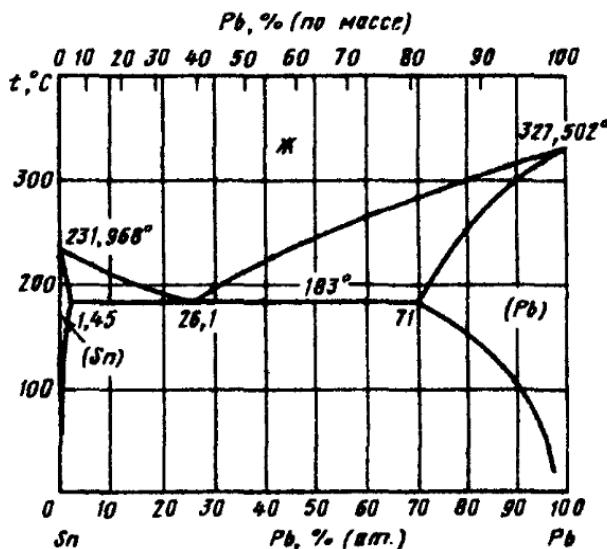


Рис. 1.5. Диаграмма состояния Pb – Sn [20]

Оловянно-свинцовые припои, содержащие сурьму, непригодны для пайки цинка и его сплавов из-за образования хрупкого химического соединения в шве. Сурьма в больших количествах ухудшает жидкотекучесть Sn – Pb припоев, снижает их коррозионную стойкость, ухудшает адгезию к паяемому металлу.

Твердость оловянно-свинцовых припоев при добавлении свинца к олову непрерывно повышается до эвтектического состава, а затем, при дальнейшем его увеличении, — снижается.

Исследования влияния допустимого содержания сурьмы в припоях Sn – Pb на их физико-химические свойства позволили классифицировать эти припои на три группы: 1) бессурьмянистые припои с содержанием до 0,05 % Sb, применяемые при необходимости получения высокой пластичности и вакуумной плотности паяных швов; 2) малосурьмянистые припои, содержащие 0,2–0,5 % Sb, с повышенной пластичностью, обеспечивающие плотные швы и применяемые для оцинкованных и цинковых деталей; 3) сурьмя-

нистые припои, содержащие 2–5 % Sb, широко используемые при абразивной пайке, а также в различных отраслях техники, где требуется повышенная прочность паяных швов.

Оловянно-свинцовые припои обладают двумя важными характеристиками, определяющими механические свойства паяного соединения: температура рекристаллизации их близка к нормальной; растворимость олова в свинце сильно изменяется при повышении температуры. При нормальной температуре в свинце растворяется 2 % Sn, тогда как при эвтектической температуре 183 °C в нем растворяется 19,5 % Sn.

Упрочнить эти припои наклепом не удается. В отличие от чистого олова деформированные оловянно-свинцовые припои имеют меньшую твердость и прочность, чем литые.

1.3. Свинцовые припои

Все припои на основе свинца склонны к ползучести вследствие низкого предела текучести у этого металла. Ползучесть может быть обусловлена межзеренным скольжением или удлинением каждого зерна сплава. Для блокирования скольжения по границам зерен и ограничения движения дислокаций в кристаллической решетке зерен, способствующего их деформации, в припой вводят серебро и сурьму. Следует отметить, что полезное действие этих элементов было известно и раньше и было реализовано при разборке припоеv типа ПОС 61 с низкой склонностью к ползучести.

Диаграмма состояния серебро – свинец приведена на рис. 1.6, диаграмма состояния свинец – сурьма – на рис. 1.7.

Чистый свинец применяют в качестве присадочного материала при пайке многих металлов, так как он слабо с ними взаимодействует. Свинец с медью, железом, никелем, кобальтом, алюминием, цинком образует диаграммы монотектического типа и поэтому не растворим в этих металлах при низкой температуре. Для активирования взаимодействия свинца с этими металлами и сплавами на их основе в него вводят компоненты, активирующие процесс взаимодействия припоя и паяемого материала и снижающие температуру плавления свинца.

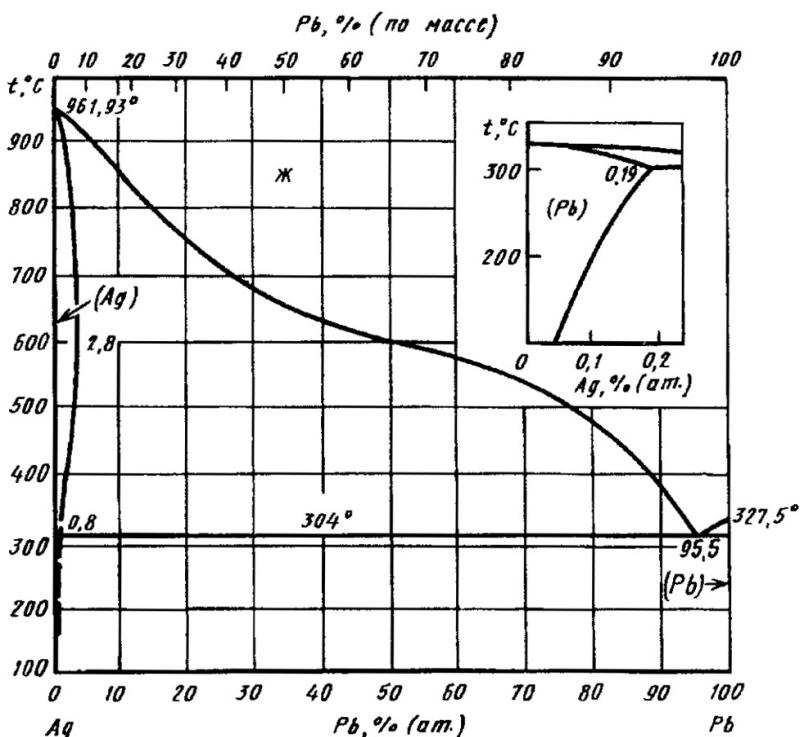


Рис. 1.6. Диаграмма состояния Ag – Pb [25]

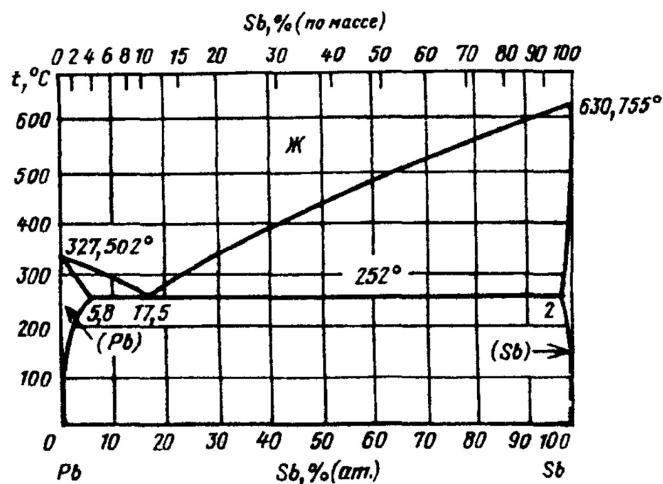


Рис. 1.7. Диаграмма состояния Pb – Sb [25]

К числу таких компонентов относятся цинк, олово, сурьма, кадмий, серебро. Растворимость их, например, при температуре 300 °C, в меди, т. е. в металле, для которого главным образом применяют свинцовые припои, составляет 35 % Zn, 11 % Sn, 3 % Sb, 0,5 % Cd, 0,5 % Ag. Первые три компонента образуют с медью также химические соединения, и поэтому содержание их в свинцовых припоях должно быть ограничено количеством, сверх которого между паяемым металлом и припоеем при пайке могут образовываться прослойки хрупких химических соединений, понижающие статическую и вибрационную прочность паяных соединений.

Максимальное содержание этих элементов в свинцовых припоях обычно не превышает 5 % Sb, 5 % Zn, 30 % Sn. Диаграмма состояния свинец – цинк приведена на рис. 1.8.

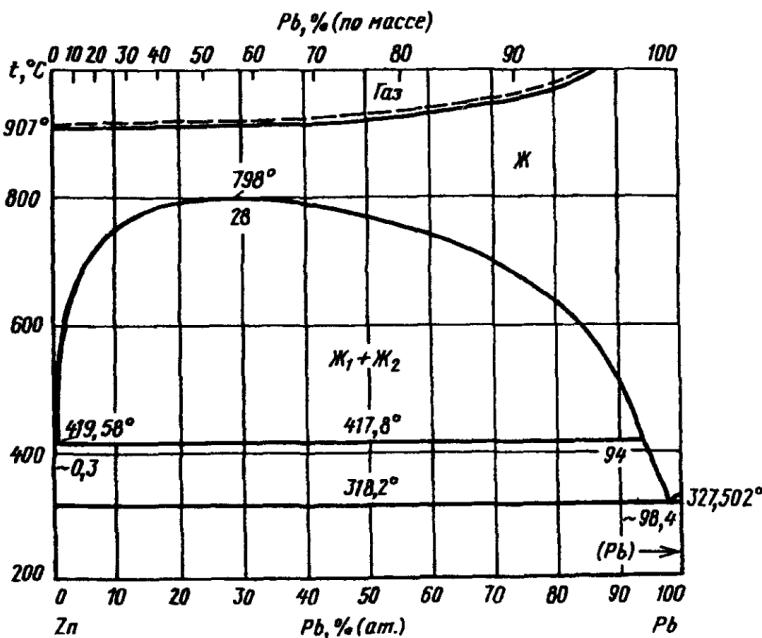


Рис. 1.8. Диаграмма состояния Pb – Zn [25]

Для некоторых специальных целей (при пайке свинца) содержание сурьмы может быть более высоким. Например, при газопламенной пайке свинцовых клемм аккумуляторных батарей применяют

припой Pb – 11 % Sb, т. е. доводят содержание сурьмы до эвтектического, что позволяет снизить температуру плавления припоя до 252 °С. Такой припой малопластичен, и его закладывают в зазор перед пайкой.

Длительная прочность свинцового припоя при введении в него сурьмы повышается.

Активирование свинцовых припоев, предназначенных для пайки меди и ее сплавов, достигается также введением в них серебра и меди. Серебро образует с медью диаграмму состояния эвтектического типа (рис. 1.9).

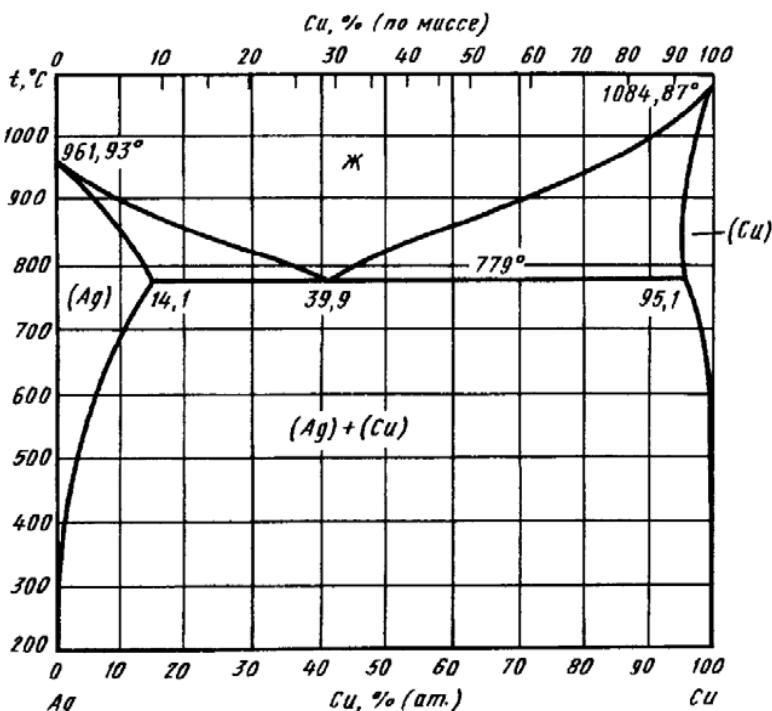


Рис. 1.9. Диаграмма состояния Ag – Cu [20]

Реальное значение для пайки меди и ее сплавов имеют эвтектики, богатые свинцом, следующих составов: 1) 82,5 % Pb – 17,5 % Cd ($t_{\text{пл}} = 248$ °С), диаграмма состояния представлена на рис. 1.10; 2) 97,5 % Pb – 2,5 % Ag ($t_{\text{пл}} = 304$ °С); 3) 87 % Pb – 13 % Sb

($t_{\text{пл}} = 247^{\circ}\text{C}$); 4) 99,5 % Pb – 0,5 % Zn ($t_{\text{пл}} = 318,2^{\circ}\text{C}$); 5) 81,7 % Pb – 17,3 % Cd – 1 % Zn ($t_{\text{пл}} = 245^{\circ}\text{C}$).

Двухфазные припои, основу которых составляет эвтектика 97 % Pb – 2,5 % Ag (см. рис. 1.6), состоящие из двух твердых растворов на основе свинца и серебра, более теплостойки, чем двухфазные сплавы Sn – Pb (см. рис. 1.5). К таким припоям относятся припой ПСр 3, содержащий ~3 % Ag, и припой Pb – 6 % Ag. Эти припои отличаются пониженной способностью к растеканию и затеканию в зазоры. Соединения из меди, паянные свинцовыми припоями ПСр 2,5 и ПСр 3, подвержены интенсивной коррозии во влажной атмосфере и дождевой воде. Для улучшения этих свойств в свинцово-серебряные припои вводят олово, а также олово и кадмий. Диаграмму состояния свинец – кадмий см. на рис. 1.10. Соединения из меди и латуни, паянные припоями ПСр 3 и ПСр 2,5, теплостойки длительно при температуре до 150 °C и кратковременно при температуре до 200 °C.

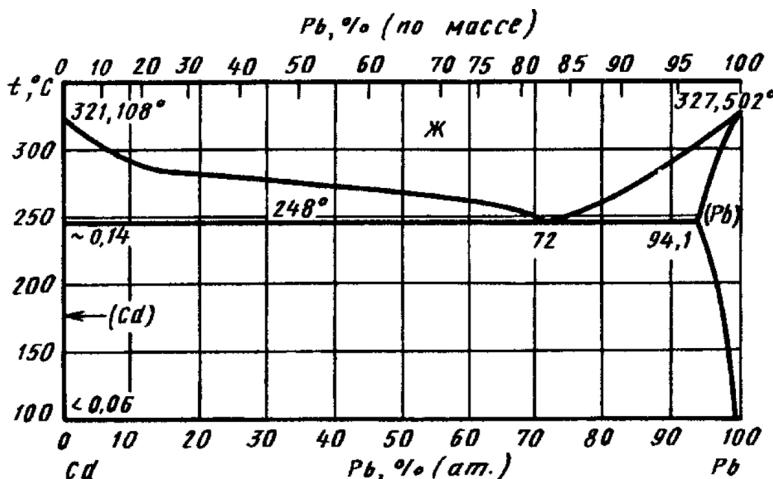


Рис. 1.10. Диаграмма состояния Cd – Pb [20]

Известны и другие припои на основе свинца, содержащие цинк и кадмий, следующих составов: 1) 99,5 % Pb – 0,5 % Zn; 2) 99 % Pb – 0,5 % Zn – 0,5 % Mg; 3) 99 % Pb – 1 % Zn; 4) 98 % Pb – 1 % Zn – 1 % Cd; 5) 98 % Pb – 2 % Zn; 6) 96 % Pb – 2 % Zn – 2 % Cd.

Высокая стоимость и дефицитность олова привели к замене припоя типа ПОС 30 на свинцовый припой с 3 % Sn. Этот припой при пайке меди образует паяные соединения, более прочные при повышенных температурах. Для еще большего повышения прочности паяных соединений в такой припой вводят небольшие добавки серебра. Одним из таких припоев является припой Pb – 2,5 % Sn – 0,5 % Ag. На базе этого припоя разработан припой с повышенной коррозионной стойкостью паяных соединений меди в тяжелых условиях эксплуатации автомобильных радиаторов (значительные колебания температуры, механическая вибрация, контактирование с водными растворами переменного состава). Припой, являясь анодом, корродирует в соединении. В механически напряженных трубках радиаторов этому также способствуют пластические деформации при ползучести паяных соединений, приводящие к механическому повреждению пленки оксида на паяном шве.

Припой с мышьяком Pb – 2,5 % Sn – 5 % Sb, содержащий до 0,5 As, имеет улучшенную растекаемость и обеспечивает при пайке латунных автомобильных радиаторов отсутствие пор. Припой с мышьяком и индием Pb – 5 % Sn – (0,1–0,8) % In – (0,1–2) % As отличается повышенной сопротивляемостью ползучести при длительной работе до температуры 105 °C.

1.4. Индиевые, цинковые и кадмиеевые припой

Плотность индия – 7,362 г/см³ при 20 °C. Температура плавления – 156 °C. Чуть больше половины добываемого индия уходит на производство жидкокристаллических экранов.

Особолегкоплавкие припой с индием обладают рядом ценных свойств. Некоторые можно применять для пайки стекла. Например, эвтектический припой, содержащий 52 % In и 48 % Sn. Температура его плавления $t_{\text{пл}} = 119$ °C, рис. 1.11.

Данный припой наносят на поверхность стекла за счет натирания. Ряд индиевых припоев обладает высокой сопротивляемостью коррозии в щелочных растворах. Введение в некоторые припой индия (25 % In) обеспечивает высокую коррозионную стойкость их в щелочах. Примером могут служить припой состава (%): 1) 37,5 Sn – 37,5 Pb – 25 In и 2) 75 Pb – 25 In.

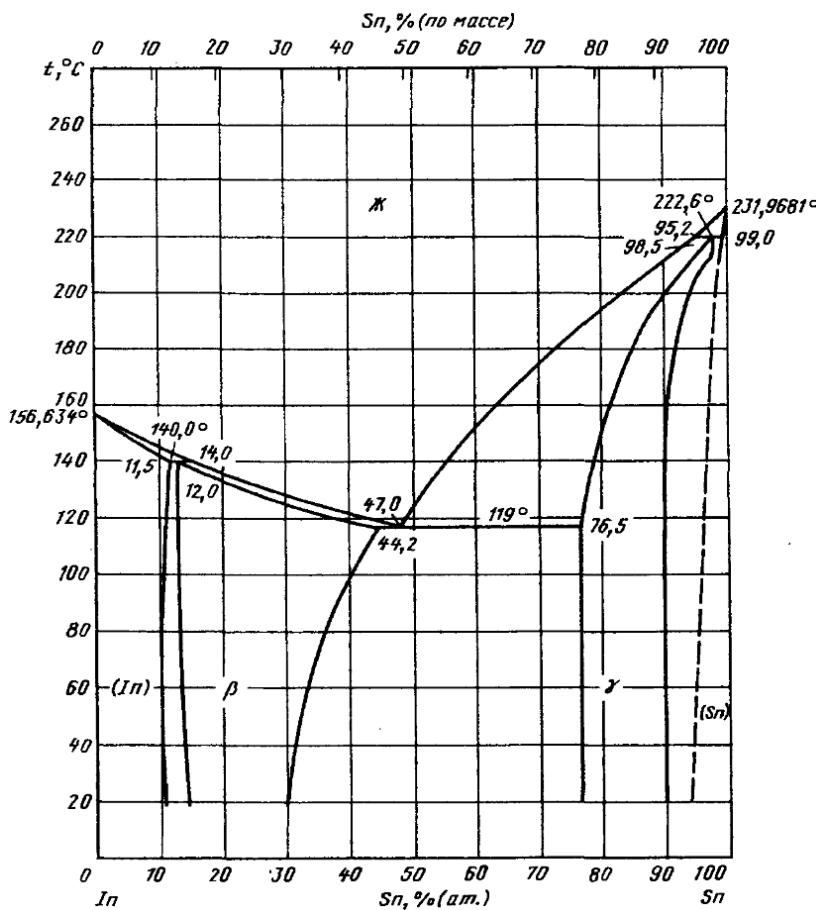


Рис. 1.11. Диаграмма состояния In – Sn [20]

Смачиваемость меди и ее сплавов этими припоями не хуже, чем оловянно-свинцовыми, не содержащими индия. Температурный интервал кристаллизации первого припоя – 135...180 °C, температура солидуса второго припоя – 230 °C.

Индиеевый припой со свинцом (50 % In – 50 % Pb) по своим технологическим свойствам близок к припоям Sn – Pb, но в отличие от них слабо растворяет золото и не охрупчивает его. Соединение из золота, выполненное этим припоеем, обладает в 100 раз более высокой термостойкостью к термоциклированию в интервале тем-

ператур $-50\ldots+155$ °С, чем соединения, паянные припоем, содержащим 63 % Sn и 37 % Pb, хотя сопротивление срезу нахлесточных соединений ниже при применении припоя с индием. Соединения, выполненные припоем 50 % In – 50 % Pb, рекомендуют использовать в изделиях, работающих при температуре до 125 °С [16].

Индий, благодаря своей высокой способности смачивать различные металлы и неметаллические материалы, введен в припой системы Tl – In – Hg, нашедший применение для пайки полупроводников, стекла, пластмассы, волокон металлов. Полупроводник PbTl паяют припоем состава (ат. %): 33 Hg – 20 Tl – 47 In без флюса и без особой подготовки поверхности.

Припой на основе индия (In – 10 % Ag) с температурой плавления 260 °С также слабо растворяет толстые золотые покрытия, хорошо их смачивает и обеспечивает требуемую прочность при термоциклировании. Его применяют для пайки толстых золотых покрытий взамен припоея 63 % Sn – 37 % Pb [16].

Сверхпроводимость медных соединений может быть обеспечена при пайке легкоплавкими припоями состава (%): 20–40 Pb, 10–15 Sn, <10 Cd, <18 In, 10 Sb. Такие соединения проводят ток силой 352 А (без припоя – силой 252 А).

В электронной промышленности для пайки серебряных деталей используют припои, легированные серебром (In – 3,5 % Ag и In – 5 % Ag), а для пайки золоченных деталей – золотой припой.

Припой с индием Pb – 37,5 % Sn – 25 % In с температурой плавления 134–181 °С также используют для пайки свинца. Припои, богатые индием, такие как припой 52 % In – 48 % Sn с температурой плавления 117 °С, весьма пластичны и сравнительно прочны. Паянные ими соединения работают при температуре $-196,15$ °С и нашли применение для пайки электронных приборов. Малое электросопротивление обнаружено у припоя 48 % Sn – 26 % Pb – 26 % In с температурой плавления 135–145 °С; в связи с этим он используется при монтаже ЭВМ и счетных машин, а также при пайке печатных плат.

Цинк среди других легкоплавких металлов (олова, свинца, кадмия) имеет наиболее высокую температуру плавления (419 °С).

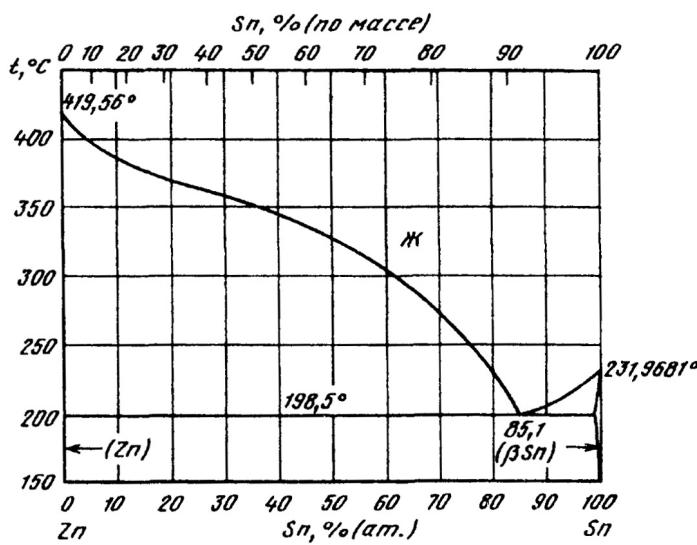


Рис. 1.12. Диаграмма состояния Zn – Sn [25]

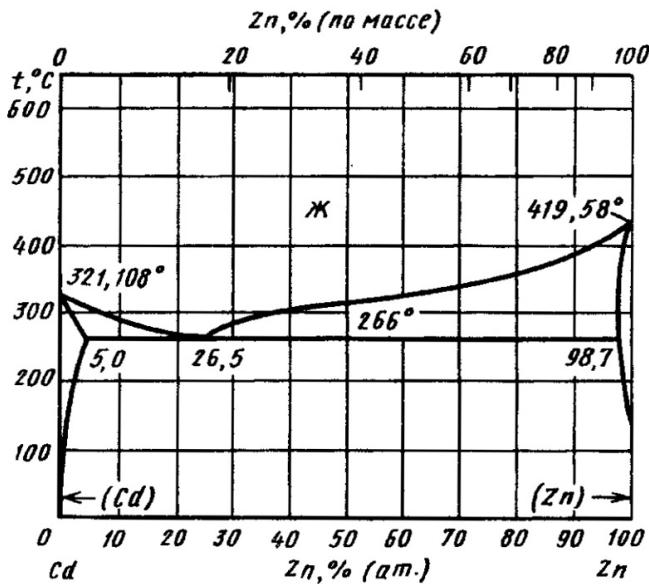


Рис. 1.13. Диаграмма состояния Cd – Zn [25]

При легировании цинка кадмием, оловом, алюминием температура плавления понижается вследствие образования легкоплавких эвтектик. Наиболее сильно снижается температура начала плавления при легировании цинка оловом (199°C); эвтектика $\text{Zn} - \text{Cd}$ плавится при 266°C , а эвтектика $\text{Zn} - \text{Al}$ при 382°C . Диаграмма состояния $\text{Zn} - \text{Sn}$ приведена на рис. 1.12. Диаграмма состояния $\text{Cd} - \text{Zn}$ представлена на рис. 1.13.

При введении в цинк серебра или меди температура плавления цинковых сплавов вследствие образования перитектики повышается. В настоящее время изучены и применяются в качестве припоев некоторые цинковые сплавы с алюминием, кадмием, медью, серебром, оловом, свинцом, температура расплавления которых находится в интервале $340 - 480^{\circ}\text{C}$.

Цинковые припои имеют ряд особенностей, определяющих их применение. Подавляющее большинство припоев на цинковой основе отличается относительно низкой пластичностью, невысокой прочностью и плохой способностью к растеканию и затеканию в зазор.

Легирование цинка оловом, алюминием, кадмием не только приводит к снижению температуры начала и конца затвердевания припоев, но и существенно влияет на их механические свойства. Так, среди сплавов $\text{Zn} - \text{Sn}$ наиболее прочны и достаточно пластичны сплавы, содержащие $20 - 30\%$ Sn. Однако эти сплавы имеют большой интервал кристаллизации ($199 - 375^{\circ}\text{C}$) и, что особенно важно, низкую температуру солидуса и поэтому неперспективны для пайки соединений, работающих в условиях нагрева до температур $200 - 250^{\circ}\text{C}$. Установлено, что относительное удлинение цинковых сплавов с оловом ($20 - 25\%$ Sn) в значительной степени зависит от скорости охлаждения при затвердевании. Относительное удлинение сплава, отлитого в кокиль, подогретый до температуры 200°C , составляет $5,2\%$.

Припои системы $\text{Zn} - \text{Cd}$ отличаются весьма низкой пластичностью даже в том случае, когда содержание в них кадмия достигает 40% (П300А). Малопластичны и сплавы цинка с алюминием, близкие по составу к эвтектике $\text{Zn} - 5\% \text{Al}$ ($t_{\text{пл}} = 380^{\circ}\text{C}$).

Пластичность припоев на основе цинка, легированных алюминием, и паянных ими соединений может быть несколько повышена при введении в них 1–5 % Al; при этом температура плавления сплава повышается примерно на 20 °C (припой ПСрбКЦН). Относительно пластичны сплавы цинка с небольшими количествами меди (<3 %). Их прокатывают в фольгу. Технологические характеристики цинковых припоев существенно зависят от состава паяемого металла.

Диаграмма состояния меди и цинка отличается относительно пологой линией ликвидуса. В связи с этим цинковые припои в жидком состоянии вызывают интенсивное развитие химической эрозии меди и ее сплавов в процессе пайки; при этом резко снижается пластичность металла шва. Наиболее целесообразна пайка этими припоями с нагревом ТВЧ, электроконтактным способом и т. п. При пайке цинковыми припоями теплостойкость паяных соединений меди меньше, чем при пайке кадмиевыми припоями. Цинк образует с железом химические соединения; при пайке сталей цинковыми припоями по границе со швом образуются прослойки таких соединений.

Одним из способов предотвращения образования прослоек интерметаллидов по границе паяемого металла и припоя в результате их химического взаимодействия является легирование припоя 98 элементами, имеющими большое химическое сродство к паяемому металлу, чем основа припоя [14; 15]. К числу таких элементов при пайке стали цинком относится алюминий. Поэтому все цинковые припои, предназначенные для пайки сталей или железа, в настоящее время легируют небольшими количествами алюминия.

Цинковые припои с кадмием, алюминием и медью применяют чаще всего для пайки алюминиевых сплавов. Важнейшее их преимущество — относительная легкоплавкость и хорошая коррозионная стойкость паянных ими соединений, особенно паянных цинковыми припоями, легированными алюминием и медью.

Цинк с алюминием образует эвтектику и широкую область твердых растворов. Цинковые припои для уменьшения эрозионного действия на алюминиевые сплавы легируют элементами, снижающими их температуру плавления и имеющими низкую предельную растворимость алюминия при температурах пайки. К таким элементам относятся, например, олово и свинец. Однако свинец в отличие

от олова, образующего с цинком эвтектику, химически слабо взаимодействует с цинком (диаграмма состояния с монотектикой).

Введение в цинковые припои системы Zn – Al – Si редкоземельных материалов улучшает их плотность и повышает смачивающую способность по отношению к алюминию при пайке и напайке [12] воздушно-пропановым пламенем. Термодинамический анализ показал возможность протекания процесса восстановления оксидов алюминия, марганца, кремния церием и празеодимом. Оксиды магния этими редкоземельными элементами не восстанавливаются.

Среди припоев на основе цинка нашел применение припой Zn – 7 % Cu с температурой плавления 350–400 °C. Припой пластичен и прокатывается в фольгу толщиной 100 мкм.

Эвтектики Zn – Al и Zn – Al – Cu недостаточно хорошо растекаются по меди и заполняют зазоры. Добавление к ним небольших количеств олова и свинца улучшает заполнение зазоров.

Цинковые припои, легированные значительными количествами алюминия или алюминия и меди, малопригодны для пайки меди и латуни из-за плохой растекаемости по этим металлам (даже с наиболее активными флюсами, содержащими хлористый цинк), а также из-за низкого временного сопротивления разрыву паяных соединений, достигающего 14,7 МПа. Не улучшает технологических свойств этих припоев также и легирование серебром (5–35 %).

Способность цинковых припоев, содержащих алюминий и медь (2,5–5 %), к растеканию и затеканию в зазор существенно улучшается при введении в них свинца и олова. Припой ПЦА8М, содержащий 8 % Al, 5 % Cu, 1,4 % Pb, 0,6 % Sn, Zn – остальное, плавящийся в температурном интервале 360–410 °C, вполне удовлетворительно растекается по меди и особенно по латуни с флюсом ФЦ-37. Увеличение содержания олова в припоях этого типа до 5 % вызывает их охрупчивание.

Растекание цинковых припоев по меди и латуни улучшается также при введении в них кадмия. Наиболее прочные соединения из меди получаются при электроконтактной пайке припоям ПЦА8М с флюсом ФЦ-37.

При пайке соединений из алюминия, меди и стали, работающих при температуре 100–150 °C, был предложен припой, содержащий

2,7 % Ag, 1–2,5 % Cu, 1–7 % Al, 0,5–1 % Cr, Zn – остальное [5]. Температура плавления такого припоя равна 380–415 °С. При низкотемпературной пайке тонкостенных изделий небольшого размера из алюминия, стали или меди может быть использован цинковый припой, легированный 0,5–0,7 % Ag, 0,5–2,5 % Cu, 0,5–2 % Cr. Температура плавления этого припоя – 400–500 °С. Соединения, паянные таким припоеем, работают до температуры 200 °С и имеют коррозионную стойкость более высокую, чем соединения, паянные свинцом или оловянно-свинцовыми припоями.

Содержание тех же компонентов в цинковых припоях, обеспечивающих повышенную теплостойкость, может быть несколько иным: 1,5 % Al, 0,5–2 % Cu, 0,5–0,75 % Cr и (или) 0,05–0,75 % Ni, Zn – остальное. Температурный интервал плавления такого припоя – 400–500 °С, временное сопротивление в литом состоянии составляет более 98 МПа. Повышенное сопротивление срезу паяных соединений обеспечивается при введении в него 0,3–1 % Al, 0,03–0,2 % Mg. Магний, вероятно, замедляет развитие межзеренной коррозии цинковых сплавов. Припой может быть использован в виде прутков и прессованной проволоки.

Отмечается, что в цинковых припоях, предназначенных для пайки алюминия и алюминия с медью, бронзой, железом и др. и содержащих 0,5–4,5 % Al, 0,1–4 % Cu, 0,005–0,08 % Mg, до 0,5 % Cr, Zn – остальное, примеси, образующие с цинком легкоплавкие эвтектики, имеют отличный от цинка электродный потенциал и поэтому ускоряют точечную коррозию припоя. Содержание примеси олова, свинца и кадмия в подобных цинковых припоях не должно превышать 0,01 %. Железо не влияет на коррозионную стойкость и смачиваемость цинковых припоеv; его содержание как примеси допустимо до 0,1 %. Для обеспечения высокой коррозионной стойкости цинковых припоеv их изготавливают из достаточно чистых металлов.

Для пайки алюминиевых сплавов со сталью и медными сплавами рекомендован цинковый припой, содержащий 2–7 % Ag, 1–2,5 % Cu, 1–7 % Al, 0,1–1,5 % Ni. Температура пайки $t_p = 350$ °С, поэтому припой пригоден для алюминиевых сплавов, упрочняемых в процессе старения. Припой хорошо растекается и смачивает паяемую поверхность; отличается хорошей прочностью и пластичностью.

В цинковые припои, предназначенные для пайки оцинкованного железа и содержащие Zn – (10–50) % Cd, для упрочнения предложено вводить 0,5–2 % Mn, 0,01–0,5 % Li и 0,01–1 % Na [8]. Перечисленные элементы образуют с цинком тонкодисперсные интерметаллиды, входящие в эвтектику, и упрочняют припой. Припой Zn – 5 % Al – 4,9 % Cu – 0,1 % Mg с температурой плавления 370–454 °C может быть применен для бесфлюсовой пайки алюминия, например, телескопических соединений трубчатых деталей после их предварительного лужения; рекомендуемый зазор – 25–190 мкм. Есть сведения, что в припое такого типа для дальнейшего повышения их коррозионной стойкости может быть введен хром (0,05–0,5 %) и повышенено содержание магния. Припой, содержащий 0,5–4,5 % Al, 0,4–4 % Cu и 0,1 % Mg, а также 0,05–0,5 % Cr, отличается высокой коррозионной стойкостью и хорошей смачиваемостью.

Высокие механические свойства соединений из алюминиевых сплавов, паянных цинковыми припоями, могут быть обеспечены также при введении в припой: 1) 2–7 % Ag, 1–7 % Cu, 0,05–0,15 % Ti или 2) 2–7 % Ag, 1–2,5 % Cu, 1–7 % Al; 0,5–1 % Cr.

Температура плавления кадмия – 321 °C, температура кипения – 770 °C. Если изгибать кадмиеvую палочку, то слышен слабый треск – это трется друг о друга микрокристаллы металла (треск слышен и при изгибе прутка олова). Любые примеси в металле устраниют данный эффект. Кадмий тверже олова, но мягче цинка – его можно резать ножом. При нагреве выше 80 °C кадмий теряет пластические свойства до такой степени, что его можно истолочь в порошок. Кадмий слабо взаимодействует с алюминием и железом. С алюминием он образует диаграмму состояния монотектического типа (рис. 1.14). Поэтому чистый кадмий почти не используют в качестве припоя для алюминия и сталей. Он нашел применение лишь для пайки предварительно латунированных стальных ободов электромашин.

Кадмий с медью образует ряд химических соединений, самое стойкое из которых разлагается при температуре 563 °C. Диаграмма состояния кадмий – медь представлена на рис. 1.15.

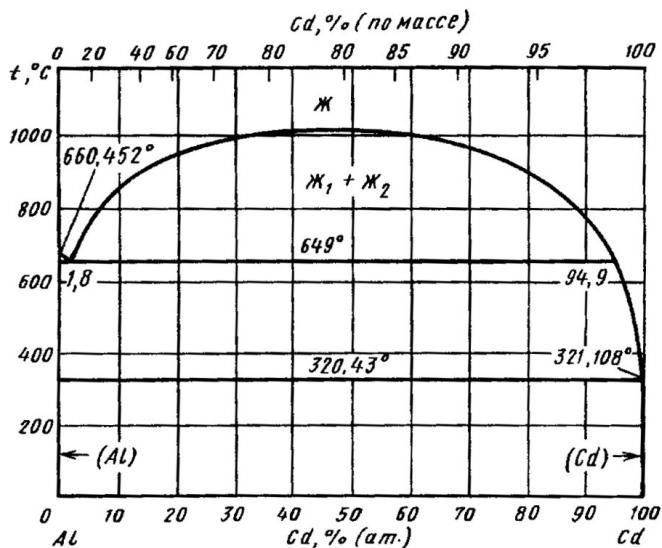


Рис. 1.14. Диаграмма состояния Al – Cd [20]

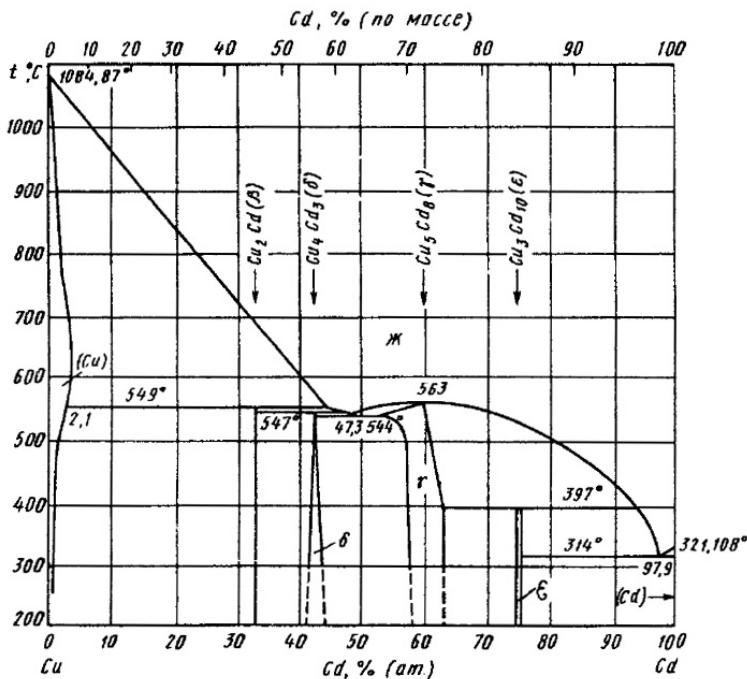


Рис. 1.15. Диаграмма состояния Cd – Cu [25]

Кривая ликвидуса на диаграмме состояния Cu – Cd весьма пологая, и предельная растворимость меди в жидким кадмии быстро возрастает с ростом температуры. В связи с тормозящим действием прослойки интерметаллида при температуре 400–450 °С имеет место замедление процесса химической эрозии меди. Поэтому кадмиевые припои до недавнего времени применяли для пайки меди и ее сплавов.

Среди кадмиевых припоев известны сплавы тройной системы Cd – Zn – Ag. Термостойкость кадмиевых припоев, так же, как и свинцовых, повышается при легировании их серебром. Кадмиевые припои имеют более высокую прочность, чем оловянно-свинцовые.

Припои K1, K3, ПСр 3Кд системы Cd – Ag обеспечивают термостойкость медных паяных соединений до температуры 250 °С (кратковременно). Наиболее термостойкие соединения (до 300 °С) из меди и латуни могут быть получены при пайке припоями системы Cd – Ag – Zn (ПСрБКЦ и ПСрВКЦН). Более высокая термостойкость соединений из меди, паянных этими припоями, по сравнению с термостойкостью самих припоев обусловлена, вероятно, легированием шва медью, перешедшей в шов при пайке. Припои ПСрБКЦ и ПСрВКЦН обладают удовлетворительной пластичностью в литом состоянии.

Для кадмиевых припоев характерно более высокое временное сопротивление ($\sigma_b = 110$ –200 МПа), чем для припоев на основе олова и свинца (18,6–42,1 МПа). Высокая прочность кадмиевых припоев не реализуется в паяных соединениях из меди и латуни из-за образования в них малопластичной прослойки интерметаллидов, по которой происходит преждевременное разрушение паяного соединения. Микротвердость светлой фазы (интерметаллида) равна микротвердости латуни; количество интерметаллида в шве возрастает с увеличением длительности процесса пайки, т. е. времени контакта жидкого припоя с медью или медными сплавами. При этом наблюдается все большее охрупчивание паяного шва.

Стали кадмиевыми припоями паяют только после их меднения. Активирование кадмиевых припоев цинком, имеющим высокое химическое сродство с железом, позволило применить их для пайки сталей и одновременно повысить их прочность. Припой такого

типа, содержащий 60–85 % Cd, 15–50 % Zn и 0,4–5 % Ni с температурой плавления 270–290 °C, пригоден для пайки не только меди, цинка и латуни, но и сталей, в том числе коррозионно-стойких. Предел текучести стыковых соединений из медного листа толщиной 2 мм, паянных таким припоем, равен 228,3 МПа; между тем временное сопротивление разрыву соединений из того же металла, паянных оловянно-свинцовым припоем, составляет 53,9 МПа. Этот припой не содержит серебро и применяется для пайки изделий в электротехнической промышленности и теплообменников. Введение никеля в припой дополнительно активирует и упрочняет его, так как никель образует с железом непрерывный ряд твердых растворов, а с кадмием – фазу типа γ -латуни.

Контрольные вопросы

1. Что называют припоем?
2. Какие металлы составляют основу легкоплавких припоев?
3. При каких температурах реализуется низкотемпературная пайка?
4. Что понимают под параметрами режима пайки?
5. С какой целью легируют легкоплавкие припои?
6. Каковы недостатки припоев на основе свинца?
7. Какова особенность кристаллизации висмута и галлия?
8. Для чего применяют висмутовые припои?
9. Что применяют в качестве наполнителя галлиевых паст?
10. Какие материалы можно паять припоями, содержащими индий?
11. Укажите область применения припоев на основе цинка.

2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПАЙКИ

2.1. Газопламенный нагрев

Процессы газопламенной пайки обладают высокой технологической гибкостью, а их тепловые режимы варьируются в широком диапазоне за счет применения различных газовых смесей. Пламя газовой горелки, применяемое для нагрева при пайке, может быть образовано в результате сгорания горючих газов или паров горючих жидкостей в смеси с техническим кислородом. При этом пламя имеет сложную структуру и строение.

Ядро пламени имеет форму цилиндра с заостренным концом, вокруг которого расположена яркосветящаяся оболочка. Длина ядра пламени регулируется скоростью подачи газовой смеси и ее качественным составом. Диаметр ядра зависит от размеров мундштука и расхода горючей смеси.

Вокруг ядра пламени размещается светлая оболочка, в которой происходит сгорание раскаленных частиц углерода, — восстановительная зона. Восстановительная зона пламени располагается в пространстве в пределах 20 мм от конца ядра. Температура пламени в этой зоне может достигать 3150 °С (при сгорании ацетилена). Размер восстановительной зоны зависит от номера сварочного мундштука. При помощи этой зоны пламени нагревают и плавят металл.

Остальная часть пламени — факел — расположена за восстановительной зоной и состоит из углекислого газа, паров воды и азота. Температура ее значительно меньше.

Пламя, обладающее высокой температурой, необходимое для нагрева под пайку, образуется при сгорании горючих газов или паров в смеси с техническим кислородом. При нормальных условиях кислород представляет собой газ без цвета, запаха и вкуса. При температуре $-182,98^{\circ}\text{C}$ и атмосферном давлении газообразный кислород переходит в жидкое состояние и при температуре $-218,35^{\circ}\text{C}$ превращается в твердое вещество. Сам кислород не токсичен, не горит, но активно поддерживает горение других веществ, при котором выделяется большое количество тепла.

Максимальная температура достигается при использовании газовых горелок при сгорании в кислороде ацетилена и составляет 3150 °С. Ацетилен представляет собой углеводород ненасыщенного ряда, его химическая формула C_2H_2 . При атмосферном давлении и нормальной температуре ацетилен – бесцветный газ. Технический ацетилен вследствие присутствия в нем примесей, например фосфористого водорода и сероводорода, имеет резкий специфический запах.

Хранение и транспортировка ацетилена осуществляются под давлением в баллонах, заполненных специальной пористой массой, пропитанной ацетоном – хорошим растворителем ацетилена, что позволяет существенно увеличить количество ацетилена, накачиваемого в баллон. Кроме того, ацетон снижает взрывоопасность ацетилена. Ацетон удерживается в порах массы и распределяется по всему объему баллона, это увеличивает поверхность его контакта с ацетиленом при растворении и выделении из раствора.

Пропан-бутановые смеси состоят из пропана (C_3H_8) с примесью бутана (C_4H_{10}) в количестве от 5 до 30 %. Их получают при переработке нефти или добыче природного газа. Для сварочных работ эти смеси поставляются в баллонах в сжиженном состоянии. Из сжиженного состояния пропан-бутановая смесь переходит в газообразное при температуре –40 °С при нормальном атмосферном давлении или при нормальной температуре, но при пониженном давлении. Температура пламени пропана и пропан-бутановой смеси при сгорании в смеси с кислородом равна 2400–2500 °С.

Водород представляет собой газ без цвета и запаха. Его получают в специальных генераторах, воздействуя серной кислотой на железную стружку и цинк. Этот горючий газ в смеси с кислородом образует взрывчатую смесь, называемую гремучим газом. Хранят и транспортируют водород в сжиженном состоянии, в которое он переходит при температуре –253 °С. Водород в газообразном состоянии легко проникает через любые неплотности, поэтому баллоны, трубопроводы и запорная арматура должны отвечать высоким требованиям герметичности. При сгорании водорода пламя практически не светится и не имеет четких границ. Температура пламени при горении водорода в кислороде достигает 2000–2235 °С.

Бензин и керосин представляют собой жидкости, получаемые при переработке нефти. При нормальной температуре и атмосферном давлении они легко испаряются и в газопламенной обработке металлов используются в виде паров. Для испарения бензина или керосина горелки снабжают специальными испарителями или распылителями. Чаще всего эти жидкости используют для резки металлов, заменяя ацетилен. При этом вместо 1 м³ ацетилена расходуется 1,3 кг керосина. Температура пламени при горении паров бензина в кислороде достигает 2500–2600 °С, при горении керосина в водороде немного меньше – 2400–2450 °С.

Нагрев незащищенных металлов перед пайкой приводит к значительному окислению их поверхности. Поэтому, как правило, при пайке горелками флюс наносят на паяемую деталь еще до подогрева, чтобы создать флюсовую защиту металла от окисления.

Нагрев при пайке ведут быстро, чтобы испарение растворителя (воды или спирта) произошло непосредственно при расплавлении флюса. Нагревают в первую очередь более массивную деталь или деталь с большей теплопроводностью.

Главным инструментом паяльщика при пайке газовым пламенем являются горелки. Горелки предназначены для получения устойчивого пламени путем смешивания горючего газа с кислородом. Каждая горелка позволяет регулировать состав, мощность и форму сварочного пламени. Образующаяся в горелке смесь газов вытекает из канала мундштука и, сгорая, дает устойчивое сварочное пламя.

Горелки подразделяют: по способу подвода горючего – на инжекторные и безынжекторные; по расходу горючего газа – на микроподъемные (10–60 дм³/ч), средней мощности (50–2800 дм³/ч), большой мощности (2800–7000 дм³/ч); по назначению – на универсальные и специализированные; однопламенные и многопламенные; по способу применения – на ручные и для механизированных работ.

Различают несколько типов сварочных горелок, но все они имеют общие конструктивные особенности. Каждая горелка состоит из рукоятки с расположенным на ней запорно-регулировочными вентилями и набора сменных наконечников. На маховички вентилей наносят наименование газа (ацетилен или кислород) и стрелки, указывающие направление вращения при открывании и закрывании.

Наибольшее применение получили инжекторные горелки, работающие на смеси ацетилена с кислородом. В этих горелках подачу горючего газа в смесительную камеру осуществляют подсосом его струей кислорода, подаваемого в горелку с большим давлением, чем горючий газ.

В безынжекторных горелках горючий газ и кислород подают при примерно равном давлении в смесительную камеру, откуда после смешивания они поступают на наконечник горелки, образуя на выходе сварочное пламя.

Мундштуки горелок изготавливают из высокотеплопроводных материалов, используя для этого меди марки МЗ или хромистую бронзу. Для устойчивого горения и правильной формы пламени поверхности выходного канала мундштука подвергают тщательной обработке. Все повреждения этого элемента горелки (заусенцы, вмятины, плохая чистота поверхности) способствуют отрыву пламени и обратным ударам. Выпускают 12 номеров сменных наконечников, отличающихся различным расходом кислорода и ацетилена. Номер наконечника выбирают в соответствии с толщиной свариваемого металла и требуемым удельным расходом ацетилена.

Для любой горелки важным является обеспечение полного сгорания газовой смеси. В частности, авторское свидетельство СССР № 1815497 для инжекторных горелок (рис. 2.1) предусматривает следующий вариант повышения эффективности сгорания газовой смеси. В центральном отверстии сопла 2 помещена вставка цилиндрической формы 7, и сама камера имеет возможность продольного перемещения.

При выходе из инжектора 6 горючей смеси через боковые отверстия 5 осуществляется подсос воздуха в смесительную камеру 4. Затем горючая смесь попадает в камеру 3. Там происходит окончательное перемешивание горючей смеси с воздухом. Затем горючая смесь поступает в центральное отверстие сопла 2 и в отверстия, расположенные по окружности. При определенных соотношениях размеров сопла, цилиндрической вставки и смесительной камеры обеспечивается более эффективное сгорание газовой смеси.

Предпочтительным горючим газом для данного варианта является пропан-бутан.

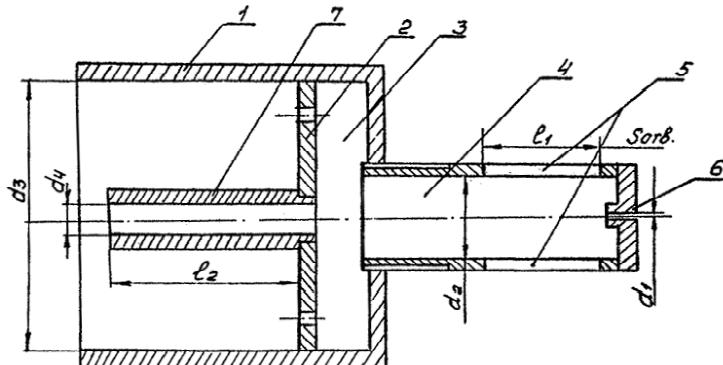


Рис. 2.1. Газовая горелка [27]

2.2. Пайка паяльником

Паяльник – инструмент для пайки металлов легкоплавкими припоями. Основное назначение паяльника – нагрев припоя до полного расплавления и нанесение его на паяемую деталь при одновременном подогреве основного металла по месту пайки. С помощью паяльников в процессе пайки паяемую поверхность очищают от оксидов и подают флюс.

Паяльник представляет собой металлический стержень, один конец имеет форму, удобную для нанесения припоя в зазор и нагрева основного металла при пайке, а другой укреплен на стальном прутке с ручкой из дерева или другого теплоизолирующего материала. Для паяльников чаще всего используют электрический нагрев, реже – газопламенный.

Паяльник нагревается периодически по мере его остывания или постоянно действующим источником теплоты, поддерживающим его температуру в определенных пределах. Перенос теплоты с паяльника на паяемую деталь происходит особенно быстро через слой жидкого припоя, который служит хорошим тепловым контактом между паяльником и деталью. При этом нагревается часть паяемой детали, соприкасающаяся с жидким припоеем. Скорость переноса теплоты паяльника на припой и паяемую деталь зависит от теплопроводности металла паяльника, припоя и паяемой детали, а также

от температуры и площади поверхности, по которой осуществляется контакт между паяльником и деталью. Температура паяльника тем устойчивее, чем больше его масса. Поэтому с увеличением массы паяльника увеличивается производительность процесса пайки вследствие сокращения времени на его подогрев, а также улучшения качества паяных швов.

Количество теплоты, необходимое для прогрева соединяемых деталей в месте наложения паяного шва, возрастает с увеличением их массы. Поэтому массивные детали нужно паять большим паяльником, аккумулирующим достаточное количество теплоты. Однако масса паяльника для ручной пайки ограничена (обычно 0,25–1 кг и реже до 2 кг). Паяльники большей массы неудобны в работе; в связи с этим ограничены и размеры паяемых деталей. Иногда при пайке паяльником детали предварительно подогревают от других источников теплоты. Тогда и размеры паяемых деталей могут быть несколько увеличены.

Паяльники чаще всего изготавливают из красной меди, имеющей хорошую теплопроводность. Медь для паяльников должна быть чистой и содержать возможно меньше примесей, особенно водорода. Такие паяльники меньше изнашиваются при пайке.

Недостаток медных паяльников – склонность к окислению при нагреве. В связи с этим появилось большое число патентов, в которых предлагаются различные способы уменьшения окисляемости паяльников при пайке. В одних патентах ориентировались на полную или частичную замену меди в паяльнике другими металлами, в других – на покрытие медных паяльников слоем металла, предохраняющим медь от окисления. Так, при изготовлении паяльников вместо меди предложено использовать никель или нейзильбер. Такие паяльники особенно рекомендуют для пайки припоями, содержащими цинк и сильно растворяющими медь. Применяют паяльники из малоокисляемых бронз. Для паяльников использовали также мягкое железо, но из-за недостаточно высокой теплопроводности железа оказалось удобнее применять пустотелые железные паяльники с медной сердцевиной. В качестве металлических покрытий, предохраняющих медь от окисления и рекомендемых для медных паяльников, применяют никель, никром, серебро.

Химическая эрозия медного наконечника паяльника может быть уменьшена при изготовлении его из хромистой бронзы, содержащей до 1 % Cr, или бронзы, содержащей 0,1–5 % Sn и 2,5–5 % Ni. Пониженная эрозия такого сплава с жидким припоем обусловлена образованием в контакте с ним на поверхности жала паяльника прослойки интерметаллида, тормозящего процесс химической эрозии. Однако вследствие более низкой теплопроводности бронз по сравнению с чистой медью скорость процесса пайки паяльниками с такими наконечниками понижена.

При пайке паяльником флюс подается отдельно или вместе с трубчатым припоем (заполненным канифолью).

Наибольшее применение имеют паяльники молоточной и остроконечной формы. Остроконечные паяльники удобны при пайке труднодоступных мест. Большое распространение получили паяльники с круглым сечением, при котором обеспечиваются наименьшие тепловые потери и поэтому происходит более полный переход теплоты с паяльника на паяемую деталь. В рабочей части паяльники имеют срезанную или остроконечную грань (жало).

С увеличением теплопроводности металла паяемой детали и ее массы необходимо увеличивать массу паяльника. При пайке медной детали паяльник должен быть более нагрет, чем при пайке детали такой же массы, но из стали.

Для снижения развития химической эрозии медного паяльника используют припой типа ПОС 61, легированный 1,5 % Cu.

При пайке электропаяльником наименьшая скорость растворения его жала в припое ПОС 61 достигается при совместном легировании и оловом ($Cu + 0,15\% Cr + 0,2\% Zr + 0,54\% Sn$). Интенсивное растворение сплава меди происходит только в течение первых двух часов выдержки. Затем на его поверхности образуются соединения Cu_3Sn и Cu_6Sn_5 , тормозящие этот процесс.

При низкотемпературной пайке металлов со стойкой оксидной пленкой, например алюминия, применяют специальные паяльники — ультразвуковые и абразивные, а также с вибрирующей стальной щеткой.

Ультразвуковая металлизация и пайка представляют собой процесс соединения материалов путем образования молекуляр-

ного контакта жидкого металла (припоя) с трудно металлизируемыми материалами под воздействием ультразвуковых колебаний, при этом металлизируемый объект приводится в соприкосновение с расплавленным металлом (припоеем), в котором возбуждается ультразвуковая кавитация. Ударные волны, возникающие при захлопывании кавитационных полостей, давления в которых могут достигать 10^5 атмосфер, разрушают пленки окислов и загрязнений на металлизируемой поверхности припоя.

Например, в ряде случаев эллипсовидная траектория движения наконечника ультразвукового паяльника не способствует возникновению интенсивной кавитации, хорошему перемешиванию припоя и очистке поверхностей. Для устранения данного недостатка предложено техническое решение (авторское свидетельство 1756049, рис. 2.2), в котором паяльник содержит вибратор 1 в виде пакета дискретных пьезокерамических пластин, поджатый к нему при помощи волновода 2 и демпфера 3 концентратор 4 ультразвуковой энергии с закрепленными на нем наконечником 5 и нагревательным элементом 6. Волновод 2 снабжен поперечными кольцевыми пазами 7. Концентратор 4 выполнен в виде усеченного конуса с наклонными пазами 8, расположенными на его образующей.

При подаче синусоидального напряжения резонансной частоты на обкладки вибратора 1 он, изменяя вследствие обратного пьезоэфекта свои геометрические размеры, возбуждает ультразвуковые колебания концентратора 4 и закрепленного на нем наконечника 5.

Вследствие анизотропии жесткости волновода 2, обусловленной наличием поперечных кольцевых пазов 7, амплитуда колебаний концентратора 4 со стороны кольцевых пазов 7 больше, чем с противоположной. Это неравенство амплитуд колебаний позволяет получить, наряду с возвратно-поступательными колебаниями наконечника 5, значительную поперечную составляющую амплитуды колебаний. Сложение продольной и поперечной составляющих колебаний позволяет получить эллипсовидную замкнутую траекторию движения наконечника 5. Выполнение концентратора 4 с наклонными пазами 8, расположенными на его образующей, приводит к анизотропии жесткости концентратора 4 и возникновению его дополнительных крутильных колебаний. Сложение продоль-

ной, поперечной и крутильной составляющих ультразвуковых колебаний приводит к возникновению сложной объемной траектории движения наконечника 5, что способствует более качественному перемешиванию припоя, лучшему разрушению пленок окислов и загрязнений поверхностей.

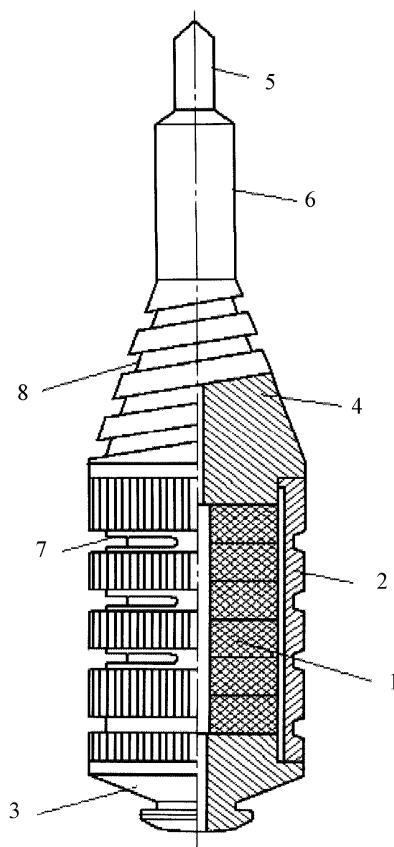


Рис. 2.2. Ультразвуковой паяльник с концентриатором [28]

Другим вариантом обеспечения требуемой траектории движения наконечника паяльника (авторское свидетельство 1590246) является асимметрично расположенные вибратор и стягивающий элемент, рис. 2.3.

Ультразвуковой паяльник содержит вибратор 1, выполненный в виде пакета пьезокерамических пластин, демпфер 2, концентратор 3 ультразвуковой энергии, стягивающий элемент 4, предохранительную проставку 5, нагревательный элемент 6, контргайку 7, рабочий орган в виде наконечника 8 и волновод 9. Вибратор 1 установлен между демпфером 2 и концентратором 3 ультразвуковой энергии. Перечисленные элементы зафиксированы с помощью стягивающего элемента 4, продольная ось которого смешена относительно оси вибратора 1. На концентраторе 3 ультразвуковой энергии через предохранительную проставку 5 смонтирован нагревательный элемент 6 с закрепленным в нем контргайкой 7 наконечником 8. Все части паяльника размещены внутри волновода 9. Предохранительная проставка 5 установлена между нагревательным элементом 6 и концентратором 3 ультразвуковой энергии.

Паяльник работает следующим образом. При подаче на вибратор 1 напряжения в нем возбуждаются высокочастотные колебания, которые через концентратор 3 передаются на наконечник 8. Установка вибратора 1 (в виде пакета пьезокерамических пластин) с эксцентрикитетом относительно продольной оси стягивающего элемента 4 обеспечивает асимметрию приложения сил. При этом наряду с продольными колебаниями наконечник 8 будет совершать еще и поперечные. В связи с этим наряду с нормальными (к обрабатываемой поверхности изделия) колебаниями действуют также и тангенциальные, при которых поверхность керамики или стеклокерамического материала не испытывает микротатаров и механических напряжений.

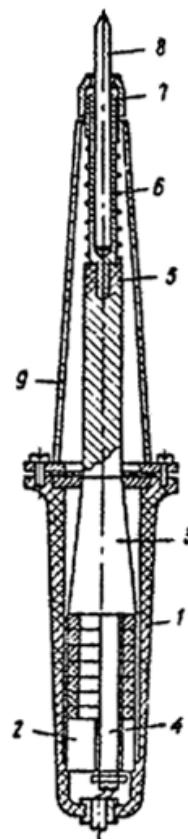


Рис. 2.3. Ультразвуковой паяльник с вибратором [29]

Внедрение обратной связи между электромеханическим преобразователем и волноводом позволяет компенсировать изменение частоты колебаний вследствие нагрева волновода и прочих причин.

Предложенный в авторском свидетельстве 1574386 ультразвуковой паяльник состоит из электромеханического преобразователя 1, соединенного с ним волновода 2, выполненного из магнитного материала и намагниченного вдоль оси, катушки 3 обратной связи и нагревателя 4, расположенных соосно волноводу, а также блока 5 управления, который выходами подключен к электромеханическому преобразователю 1 и нагревателю 4, а входом — к катушке 3 обратной связи (рис. 2.4).

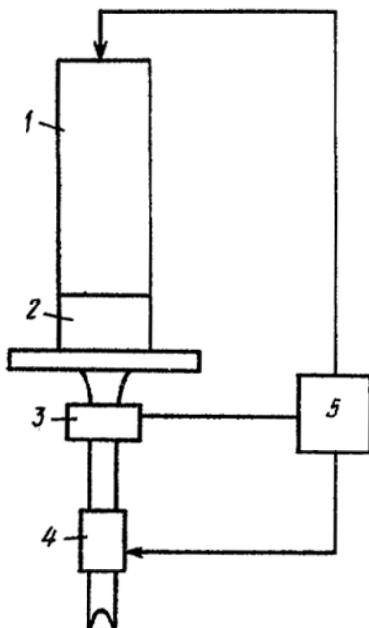


Рис. 2.4. Ультразвуковой паяльник с нагревателем [30]

Ультразвуковой паяльник работает следующим образом. При подаче сигнала с выхода блока 5 управления на преобразователь 1 в нем возбуждаются продольные колебания ультразвуковой частоты. Ультразвуковые колебания передаются и усиливаются волноводом 2. Продольные колебания волновода вызывают изменение его

магнитного поля, что приводит к появлению ЭДС в катушке 3 обратной связи. С катушки обратной связи сигнал попадает на вход блока 5 управления. При работе паяльника вследствие изменения механической нагрузки, температуры, износа инструмента рабочая частота волновода изменяется. Увеличение тока через обмотку нагревателя 4 с целью регулировки рабочей температуры паяльника приводит одновременно к увеличению рабочей температуры паяльника и к увеличению магнитного поля подмагничивания, что компенсирует изменение частоты колебания вследствие нагрева волновода 2 паяльника. В конструкции паяльника катушка 3 обратной связи и нагреватель 4 пространственно разнесены с целью увеличения термостабильности датчика. После нагрева жала паяльника осуществляется пайка.

Для экономии электроэнергии также может быть применен паяльник по авторскому свидетельству 653049. В данном техническом устройстве нагревательный элемент выполнен в виде соосно расположенных и изолированных между собой втулок, образующих полость для припоя и установленных с ним в электрическом контакте.

Паяльник содержит корпус 1, нагревательный элемент из порошковой графито-песчаной смеси, выполненный в виде отдельных соосно расположенных втулок 2, изолированных между собой керамическими шайбами 3, образующими своими внутренними диаметрами цилиндрическую полость 4 для припоя 5, паяющий стержень 6 с отверстием 7 для выхода припоя, изолированный от втулок 2 прокладкой 8, ручку 9 с токоведущими проводами 10 и крышку 11, несущую воздушный клапан 12 (рис. 2.5).

Паяльник работает следующим образом. Посредством токоведущих проводов 10 от источника питания на корпус 1, например в точку А, и на паяющий стержень 6, например в точку Б, подается напряжение. От корпуса 1 электрическая цепь проходит через втулку 2 и припой 5 к паяющему стержню 6. Нагреваются втулки 2 из порошковой графито-песчаной смеси, а затем припой 5. Таким образом, в нагреве участвуют только те втулки, которые соприкасаются с припоеем 5. Этим автоматически обеспечивается более высокая экономичность работы паяльника, так как по мере понижения уровня припоя постепенно выключаются из работы вышележащие втулки,

т. е. постоянно включена в работу та часть нагревательного элемента, которая необходима для расплавления оставшегося припоя.

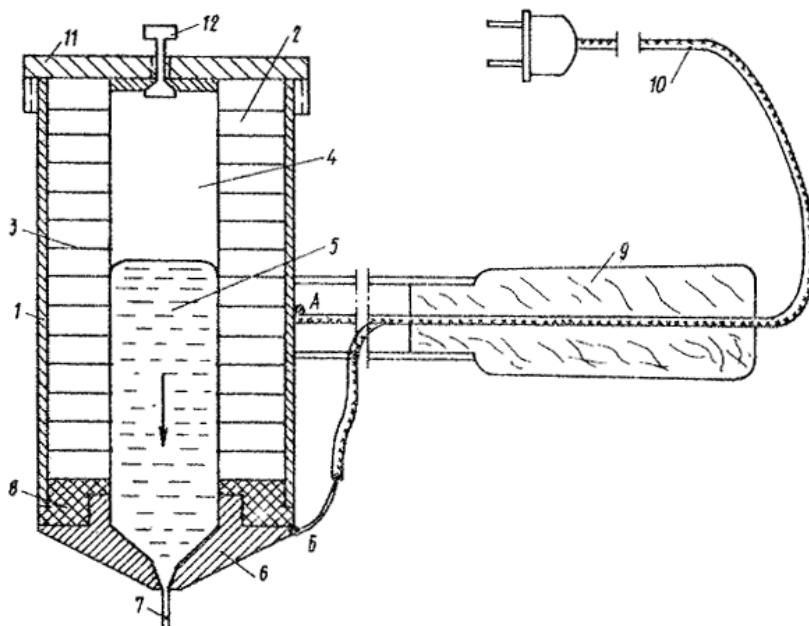


Рис. 2.5. Экономичный паяльник [31]

К высокотемпературным паяльникам, обеспечивающим разогрев наконечника до 900 °С, относятся паяльники с плазменным нагревом.

В процессе совершенствования паяльников были созданы посты с пультом управления, имеющие, кроме паяльника, подставки пружинного типа, механизм подачи припоя, вытяжные вентиляционные устройства, поддоны с губчатым материалом для очистки жала, устройство ступенчатого регулирования температуры и визуальной регистрации ее на цифровом дисплее.

В микроэлектронике получили применение и развитие паяльники для распайки паяных соединений, функция которых состоит в нагреве места пайки выше температуры ликвидуса металла паяного шва и удалении полученного расплава из зазора путем отсасывания и сбора его с помощью специального устройства.

Для охлаждения элементов во время пайки (при необходимости) применяют испарительный метод (нанесение дозы испаряющегося вещества), обдув газом, специальные термоэкраны.

Конструктивно большинство современных паяльников представляют собой электронагреватель и в контакте с ним жало. При этом важно обеспечить наилучший теплообмен между нагревателем и жалом. Один из вариантов улучшения теплообмена – минимизация слоя электроизоляции, например, применение оксидной изоляции и использование материалов с разным температурным коэффициентом расширения, авторское свидетельство 1794607.

Электропаяльник (рис. 2.6) состоит из корпуса 1, на конусное окончание которого надета конусная втулка 2, зажимающая в конусном посадочном месте жало 3, ленточного нагревательного элемента 4, теплорадиационного экрана 5, теплоизолатора 6, посредством которого корпус 1 крепится к ручке.

Корпус (теплопровод) 1 состоит из двух взаимосопряженных частей 7, 8 (рис. 2.7), на внутренних плоскостях которых выполнены вдоль оси буртик 9 и канавка 10 и перпендикулярно оси канавка 11 и буртик 12. В конусной части выполнено конусное посадочное место 13 под жало 3. На оксицированную поверхность корпуса 1 намотан ленточный нагревательный элемент 4, начальный конец которого перед намоткой зажимается между буртиком 9 и канавкой 10. Малая толщина оксидной изоляции улучшает теплотехнические характеристики за счет отсутствия воздушного зазора между оксидной изоляцией и пленкой для электроизоляции от ленточного нагревателя, намотанного на корпус. Корпус выполнен из двух взаимосопряженных частей. Жало вставляется в корпус и зажимается конусной втулкой, выполненной из материала с меньшим коэффициентом линейного расширения, чем у материала корпуса, за счет чего при нагреве осуществляется более тесный тепловой контакт между жалом и корпусом 1.

За счет того, что втулка выполнена из материала с коэффициентом линейного расширения, меньшим коэффициента линейного расширения корпуса, она плотно зажимает жало, обеспечивая плотный контакт.

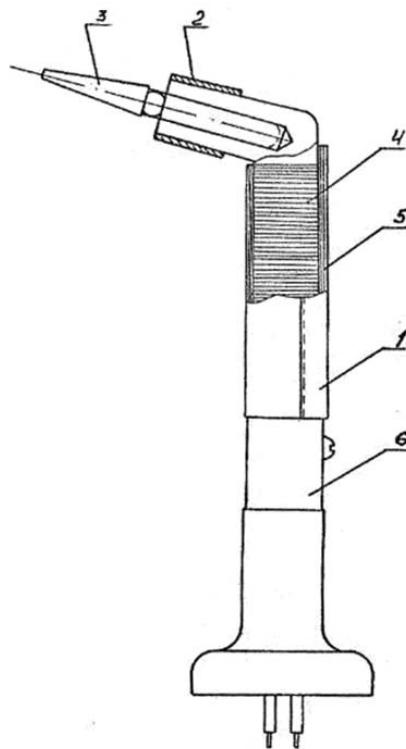


Рис. 2.6. Паяльник [32]

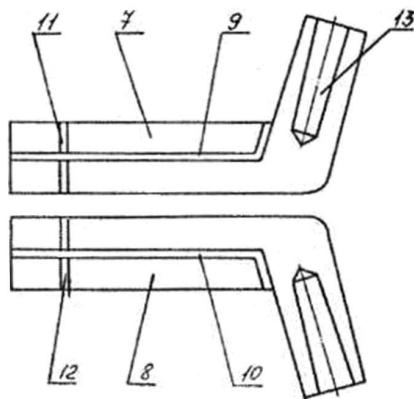


Рис. 2.7. Корпус паяльника [32]

Часто в практике поверхностного монтажа пайка многовыводных микросхем, особенно с шагом выводов менее 0,5 мм, вызывает большие проблемы и является крайне трудоемкой процедурой. Основной причиной этих затруднений является практика пайки каждого вывода в отдельности.

Паяльник, оснащенный жалами типа «мини-волна» (в некоторых источниках – «микроволна»), позволяет паять все выводы по стороне микросхемы одним проходом инструмента – паяльника (рис. 2.8).



Рис. 2.8. Принцип пайки жалом «мини-волна» [33]

Запатентованный фирмой PACE наконечник типа «мини-волна» (Mini-Wave) отличается наличием резервуара для припоя в виде углубления особой формы на рабочей поверхности жала. Жала этого типа различаются по диаметру рабочей части и типу крепления, но идентичны по принципу действия. Профиль углубления, толщина стенок и барьерный угол рассчитаны так, чтобы капля припоя в нем удерживалась силами поверхностного натяжения, и эти же силы удаляли излишки припоя с пропаиваемых выводов, исключая образование «мостиков» между ними и выполняя тем самым функцию автоматической дозировки припоя, а именно: при омывании мест пайки избыточным количеством припоя под действием сил поверхностного натяжения на выводах компонентов и контактных площадках осаждается ровно столько припоя, сколько необходимо и достаточно для каждого соединения. И процесс, и результат абсолютно аналогичны пайке на обычной волновой машине. Конструкция паяльника не усложняется (как в случае паяльника с системой

мой подачи припоя), см. рис. 2.4, вес паяльника не увеличивается. Наконечники имеют высокую износостойкость и отличаются сравнительно невысокой ценой.

К преимуществам метода пайки мини-волной следует отнести следующие. Время нагрева каждого контакта составляет не более 1–2 секунд, что исключает образование слоя интерметаллидов, снижающего качество и прочность соединения. Галтель в точке соединения вывода элемента с контактной площадкой платы получается в соответствии с требованиями стандартов. Нет нужды в точной дозировке припоя, так как он сам распределяется по контактам в оптимальном количестве. Данная технология обладает высокой универсальностью, например, для пайки корпусов PLC достаточно развернуть мини-волну в вертикальную плоскость.

Последовательность действий при монтаже пайкой компонентов на печатную плату методом «мини-волна» показана на рис. 2.9.



Рис. 2.9. Процедура пайки жалом «мини-волна» [34]

При помощи антистатического вакуумного манипулятора (например, Vampire), микросхему устанавливают на предварительно очищенные и залуженные (с помощью того же жала «мини-волна») контактные площадки. Для закрепления микросхемы можно припаять два диагонально противоположных вывода тонким жалом. Затем приступают к групповой пайке мини-волной каждой из четырех линеек выводов корпуса. Время пайки составляет около двух минут — меньше, чем время предварительной подготовки. Линейку выводов микросхемы флюсируют, используя жидкий флюс или крем-флюс, не требующий отмычки. Углубление на конце жала «мини-волна» заполняют припоеем с небольшой горкой, а затем медленно (так, чтобы на каждый вывод в линейке приходилось не менее полутора секунд), почти без нажима перемещают жало пер-

пендикулярно выводам микросхемы от начала линейки и до конца. Оптимальная температура пайки (точнее, индицируемое значение температуры термодатчика) при использовании различных модификаций жала «мини-волна» составляет от 235 °C (жало TechWell) до 285 °C (тонкое жало MicroWell).

Принципиальное значение имеет стабильность температуры при перемещении жала от начала до конца каждой линейки выводов — это выгодно отличает данный инструмент от обычного паяльника. Качество пайки можно оценить визуально и на слух, проводя тонким пинцетом по линейке припаянных выводов и вслушиваясь в издаваемый звук. Схожая техника используется для пайки микросхем в корпусе PLC ножевидным жалом (с боковой рабочей поверхностью) при температуре 250 °C.

Данный способ пайки при монтаже и ремонте узлов в условиях мелкосерийного и единичного производства радиоэлектронной аппаратуры находит все более широкое распространение, несмотря на сравнительно высокую цену, в которую обходится замена обычного паяльника на паяльную станцию с представленным инструментом. Решение о замене зависит от того, насколько технологически сложные и дорогостоящие изделия производятся (ремонтируются) на предприятии и как важна при этом производительность труда. При пайке микросхем в корпусе PQFP-208 (выводы размещены со всех четырех сторон) с шагом выводов 0,5 мм применение паяльной станции ERSA с жалом «мини-волна» ускоряет выполнение работ в двадцать раз по сравнению с пайкой выводов традиционным паяльником. Затраты на припой уменьшаются в десять раз. Расход паяльных жал снижается в четыре раза — и все это при высоком качестве пайки.

Хотя в настоящее время сборочно-монтажные работы автоматизируются, спрос на ручные паяльные и ремонтные станции фирм Pace, Weller (Cooper Tools), ERSA по-прежнему высок. К этому ряду прибавились фирмы Kohler и MARTIN. Для обеспечения ремонтных и наладочных работ такие станции, помимо паяльников, снабжают всеми видами инструментов для демонтажа, снятия лака, напайки перемычек, очистки, подлакировки и т. д.

2.3. Пайка в печах

Нагрев в печах при пайке металлов и сплавов известен давно, но только с применением в промышленности электрических печей этот способ получил особенно широкое распространение. При пайке в электропечах нагрев легко поддается контролю и регулировке и может быть легко механизирован.

Одна из особенностей низкотемпературной пайки в печах – передача тепла реализуется в основном по механизму конвекции. В качестве примера печей с передачей тепла механизмом конвекции и предназначенных для пайки печатных плат рассмотрим печи компании SEHO, Германия.

Продукция компании SEHO предназначена для пайки бессвинцовыми припоями. Однако возможен вариант пайки пастой, содержащей в своем составе свинец. Другая особенность оборудования данной компании – печи не предусматривают пайку в азотной среде. Анализ европейского рынка показывает, что в настоящее время наблюдается значительный спад применения многозонных конвекционных печей, предназначенных для пайки в азоте. Это объясняется тем, что значительные расходы, связанные с получением азота (в баллонах или с применением генераторов азота), не приводят к существенному росту качества пайки. К тому же применение качественной элементной базы, современных технологий изготовления печатной платы и паяльной пасты высокого качества в совокупности со стабильным профилем оплавления в конвекционной печи с обычной воздушной средой позволяют добиться результата пайки, сравнимого с качеством пайки в печах с азотной средой.

Конвекционные системы пайки оплавлением, печи серии GoReflow немецкой компании SEHO (рис. 2.10) подходят для мелкосерийного и среднесерийного производства. Общая длина зон нагрева (рис. 2.11) составляет 1850 и 2350 мм соответственно. Всего пять или семь зон нагрева (рис. 2.12, 2.13) и средняя скорость работы 0,55–0,7 м/мин обеспечивают высокую гибкость в создании термопрофиля. Это важно при пайке бессвинцовыми припоями.



Рис. 2.10. Печи серии GoReflow [35]



Рис. 2.11. Общий вид зон нагрева моделей GoReflow [35]

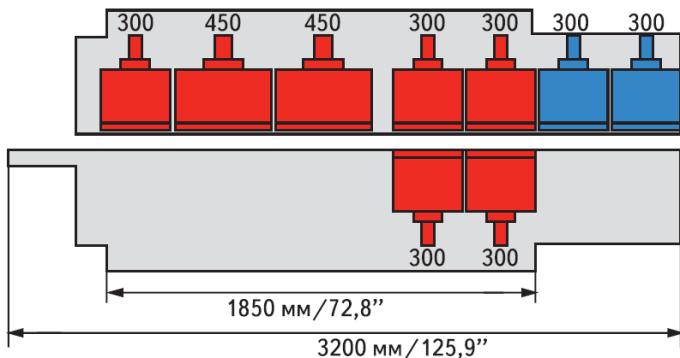


Рис. 2.12. Схематичное изображение зон в модели GoReflow 1.8 [35]

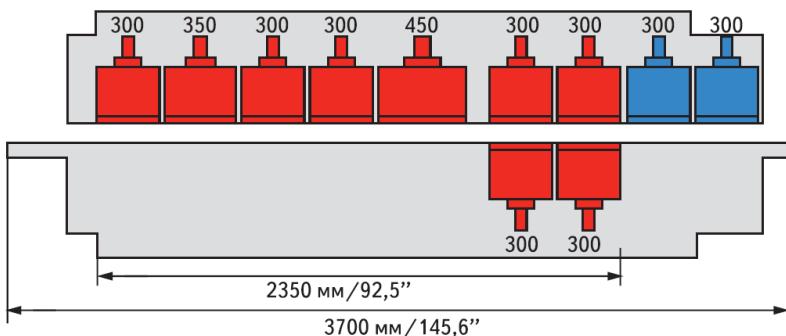


Рис. 2.13. Схематичное изображение зон в модели GoReflow 2.3 [35]

Для возможности охлаждения печатных плат после процесса пайки модели серии GoReflow оборудованы одно- и двухзонными вентиляторными модулями охлаждения. Общая длина модуля охлаждения составляет 300 и 600 мм соответственно.

Система управления конденсатом с нержавеющим стальным фильтром интегрирована в зону пайки и зону охлаждения. Остатки флюса собираются в пластиковую емкость и легко могут быть удалены.

В зависимости от требований производства предоставляется выбор системы конвейера. Система может быть реализована в исполнении сетчатого или цепного/пальчикового конвейера с центральной поддержкой или без нее. Имеется возможность выбора комбинированного конвейера.

Из дополнительных преимуществ, выделяющих данные модели среди оборудования других производителей, следует отметить следующие: за каждой зоной нагрева ведется непрерывный мониторинг и контроль; программирование параметров режима печи не требует специальных знаний и обеспечивает быструю настройку значений температуры; всего в память можно записать 100 программ режима пайки; имеется разъем для подключения принтера. Кроме того, есть функция защиты паролем.

Следующая модель, которую также рассмотрим подробно, – PowerReflow 2.4 (рис. 2.14). Ее особенностью является специальная конвейерная система, не оказывающая влияния на температурное поле. Это обеспечивает высокую стабильность параметров режима пайки. Также обеспечивает высокую стабильность температурного поля наличие в каждой зоне нагрева вентилятора для принудительного перемешивания воздуха.



Рис. 2.14. Общий вид модели PowerReflow 2.4 [35]

PowerReflow 2.4 разработана для среднесерийного и крупносерийного производства и отличается высокой эффективностью передачи энергии. PowerReflow 2.4 оборудована оригинальной транспортной системой, которая не только не оказывает влияния на термический профиль, но и обеспечивает 100-процентную параллельность направляющих цепей конвейера. Направляющие конвейера выполнены в виде стальной струны по всей длине машины.

Данная технология позволяет максимально снизить теневой эффект направляющих при конвекции по всем рабочим зонам нагрева.

В системе PowerReflow 2.4 используется технология тангенциальных вентиляторов, тем самым обеспечивается высокое качество пайки и высокая стабильность параметров режима от партии к партии.

Высокая степень однородности распределения тепла при умеренных скоростях газа обеспечивается за счет большого объема циркулируемого газа и специально приспособленных щелевых насадок. Модули конвейеров FDS с тангенциальными вентиляторами в комплекте с настроенными горизонтальными насадками обеспечивают высокую однородность распределения потока и, как следствие, максимально удобную и нужную температуру (что важно для чувствительных к температуре компонентов).

Технология FDS обеспечивает высокий объем циркуляции воздуха за счет нового способа применения тангенциальных вентиляторов (в 1,5 раза выше, чем у ближайших аналогов).

Пины цепного конвейера в стандартной поставке имеют длину 3 мм (5 мм опционально), рис. 2.15. Максимальная ширина конвейера – 500 мм, направление движения – слева направо. Регулировка скорости конвейера обеспечивается в диапазоне от 0,2 до 2 м/мин.

В конструкции предусмотрен автоматический смазчик конвейерной цепи, программируемый с помощью управляющего компьютера.

Электрическая регулировка ширины цепного конвейера возможна с помощью переключателя или посредством программного обеспечения.

Средняя скорость конвейера – 0,55–0,8 м/мин для продолжительности процесса от 3 до 4,5 минуты. Длина конвейера на входе и выходе – 370 мм.

Возможен вариант комбинированной системы конвейера (цепной и сетчатый) с максимальной шириной конвейера 480 мм.

Американская компания Electrovert, расположенная в городе Франклине, штат Массачусетс, является подразделением всемирно известной компании Speedline Technologies (США). Electrovert занимается разработкой и производством конвекционных печей оплавления, систем пайки волной припоя и конвейерных систем отмывки печатных плат с начала 1951 года.



Рис. 2.15. Конвейерная система [35]

В 2006 году Electrovert анонсировала новую серию печей OmniFlex: с семью зонами нагрева – OmniFlex7 и с десятью зонами нагрева – OmniFlex10. Прототипом OmniFlex стала серия печей OmniExcel, которые почти за десятилетие производства завоевали признание по всему миру и используются самыми известными производителями электроники, такими как Jabil, Selestica, Elcoteq, Motorola и т. д. Печи OmniFlex претерпели ряд изменений, коснувшихся конструкции, некоторых узлов и дизайна, однако одним из наиболее существенных изменений стала комплектация печей. Базовая комплектация включает все опции, которые необходимы в условиях современного производства. Основным моментом в конвекционных печах является технология теплопередачи от нагревателя к печатной плате. К этому процессу предъявляется ряд требований, необходимых для получения качественной пайки: равномерный нагрев изделия по ширине конвейера, отсутствие «холодных пятен», возможность сегрегации зон по температуре, отсутствие смещения компонентов воздушным потоком, минимальные энергозатраты, а если пайка происходит в азотной среде, то и минимальный расход азота.

Компания Electrovert в современных печах применяет схему теплопередачи, изображенную на рис. 2.16. Концепция такой схемы — циркуляция больших объемов газа с минимальной скоростью потока. Около 80 % атмосферы из зоны нагрева проходит, прогреваясь, через радиатор (*в*), перемешивается с 20 % атмосферы, забираемой по краям зоны (*д*), в камере (*б*) вентилятором (*а*) и подается обратно в зону нагрева через перфорированную панель (*г*). За счет забора атмосферы по краям зоны (*д*) достигается сегрегация зон нагрева, которая позволяет добиться разницы температур между соседними зонами в 80–100 °С. А благодаря перфорированной панели (рис. 2.17) создается равномерный по всей площади воздушный поток без «холодных пятен» (рис. 2.18).

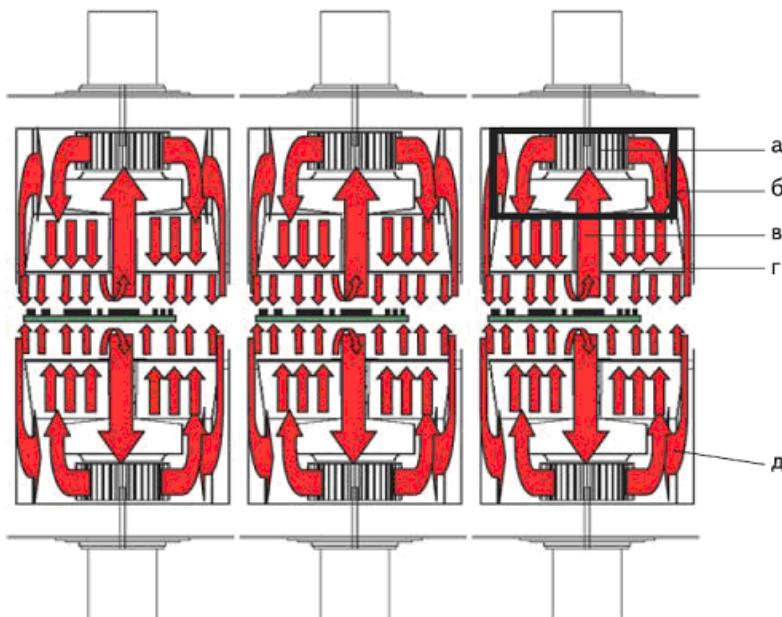


Рис. 2.16. Схема теплопередачи
в печах OmniFlex [36]

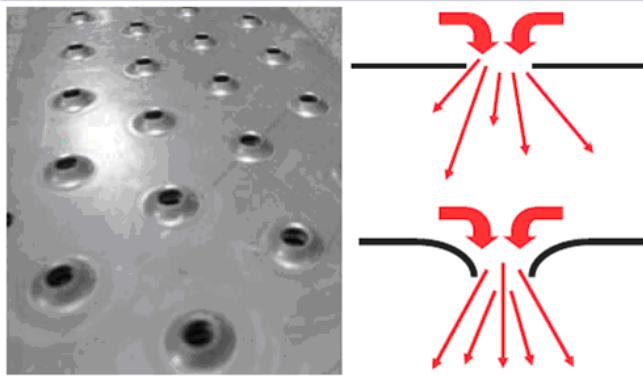


Рис. 2.17. Перфорированная панель [36]

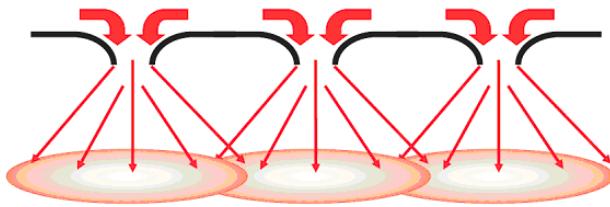


Рис. 2.18. Схема воздушного потока без «холодных пятен» [36]

В печах OmniFlex используются нагревательные элементы (рис. 2.19) мощностью 5 кВт (первая, седьмая зоны) и 3 кВт (вторая – шестая зоны) с площадью нагревающей поверхности 5806 см². При этом загрузка элементов составляет 50–60 % полной мощности, что обеспечивает длительный срок службы. Вентиляторы (рис. 2.20) аналогично нагревателям загружены на 50–60 % максимальной мощности и при правильной эксплуатации не потребуют замены в течение всего срока службы печи.

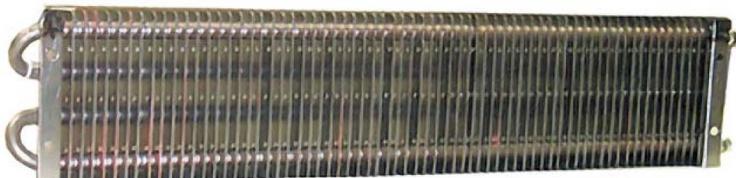


Рис. 2.19. Нагревательные элементы печи OmniFlex [36]

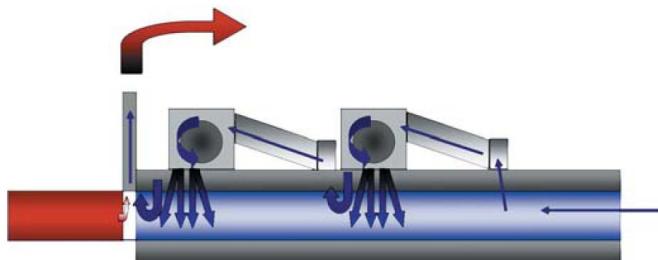


Рис. 2.20. Охлаждение забортным воздухом при пайке в воздушной среде [36]

Кроме того, каждый вентилятор в базовой комплектации снабжен системой обратной связи, которая позволяет, во-первых, в случае отказа вентилятора сообщить оператору о возникшей проблеме и одновременно контролирует скорость вращения, синхронизируя скорости вращения всех вентиляторов печи, исключая перетекание воздуха из зоны в зону. Для управления конвекционным потоком вентиляторы имеют четыре скорости вращения.

Четыре скорости вращения имеют вентиляторы и в зонах охлаждения. Печи OmniFlex7 имеют две зоны охлаждения, OmniFlex10 – три.

При пайке в воздушной среде охлаждение происходит забортным воздухом (рис. 2.20), подающимся во вторую (третью) зону охлаждения через сечение конвейерной системы. Предварительно нагретый во второй зоне воздух подается в первую зону, из которой уходит в вытяжку, расположенную между зонами нагрева и зонами охлаждения.

При пайке в среде инертного газа или при необходимости интенсивного охлаждения используется система водяного охлаждения VariCool (рис. 2.21).

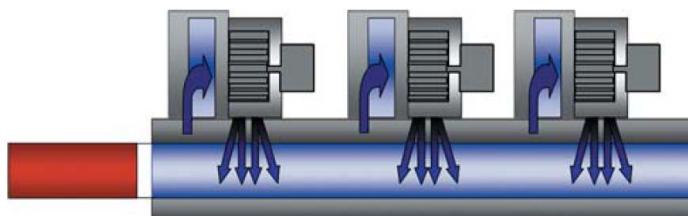


Рис. 2.21. Схема системы водяного охлаждения VariCool [36]

В этом случае газ циркулирует внутри каждой зоны охлаждения, нагреваясь на плате и охлаждаясь на водяном радиаторе. Водяной контур может быть замкнутым, при этом вода охлаждается в отдельном модуле печи, или разомкнутым, тогда подключается проточная водопроводная вода или внешний модуль охлаждения. Каждая зона охлаждения комплектуется системой сбора конденсата.

При пайке в среде азота рекомендуется использовать систему очистки атмосферы печи FCS (Flux Collection System). Обусловлено это тем, что в отличие от печей, предназначенных для работы в воздушной среде, выброс рабочей атмосферы в вытяжку должен быть минимальным (в связи с довольно высокой стоимостью азота). И если не очищать циркулирующий в печи долгое время газ, то будет происходить осаждение конденсата флюсов на внутренней поверхности и в труднодоступных местах печи (например, на радиаторах и вентиляторах). В печах производства компании Electrovert используется двухступенчатая система очистки атмосферы (рис. 2.22).

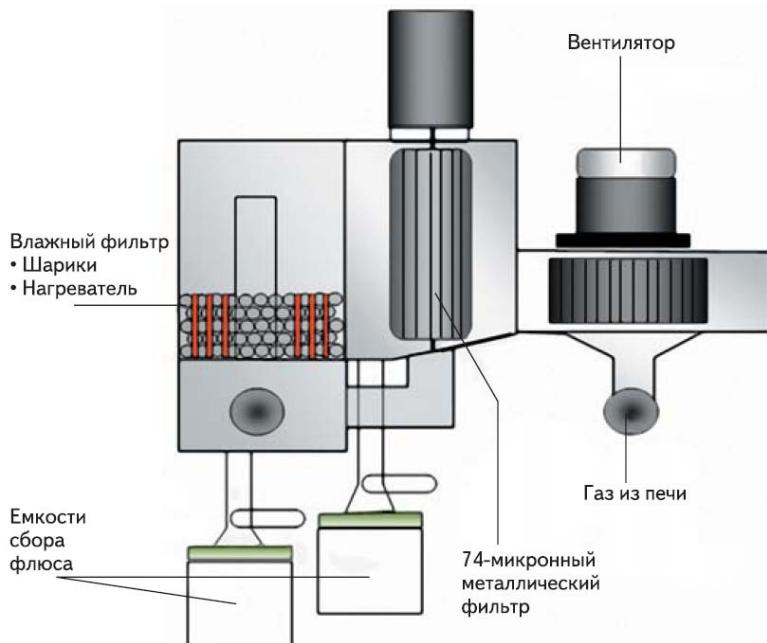


Рис. 2.22. Двухступенчатая система очистки атмосферы [36]

Газ нагнетается вентилятором и проходит через вращающийся металлический фильтр, на котором оседает часть флюсов и твердые частицы. За счет центробежной силы отфильтрованные частицы разбрасываются по стенам камеры и стекают в емкость для сбора конденсата. Газ, прошедший через металлический фильтр, попадает в камеру с металлическими шариками, на которых, конденсируясь, оседают пары флюса.

Поскольку шарики вибрируют, конденсат стекает и попадает в емкость для сбора флюса. Каждая емкость имеет оптический датчик, сообщающий оператору о заполнении. Обслуживание системы заключается лишь в том, чтобы удалить скопившийся флюс и промыть металлический фильтр. В печах OmniFlex7 устанавливаются три модуля системы FCS, в OmniFlex10 – четыре.

В базовой комплектации печи OmniFlex поставляются с комбинированным конвейером (рис. 2.23).

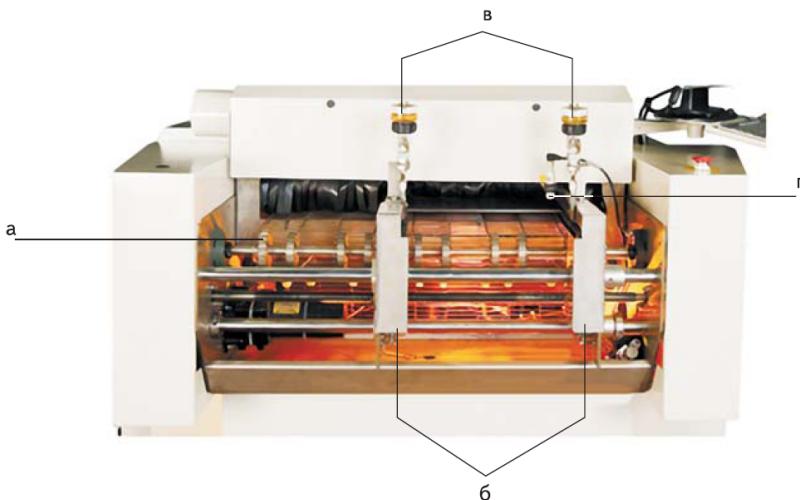


Рис. 2.23. Комбинированный конвейер [36]

Комбинированный конвейер – это комбинация сетчатого (а) и цепного (б) конвейеров. Также в базовую комплектацию включены система полуавтоматической смазки конвейеров (в) и оптические датчики на входе (г) и выходе из конвейера, позволяющие кон-

тролировать наличие плат внутри печи и предупредить оператора, если плата не вышла из печи в расчетное время.

Рассмотрим оборудование для конвекционного нагрева швейцарской фирмы ESSEMTEC. Печь RO300FC предназначена для производителей, выпускающих продукцию в диапазоне малых и средних серий изделий. Для современных производств данного типа характерно следующее: оптимальные затраты на приобретение оборудования; сравнительно небольшие габариты установки; возможность использования печи для работы с традиционными и бессвинцовыми паяльными материалами, сушки клея; использование печи (при необходимости) для работы в конвейерной линии SMT; способность четко отстраивать и отслеживать термопрофили пайки и самое важное – получить на выходе качественное изделие. Печь RO300FC в полной мере отвечает перечисленным требованиям.

Конвейерная печь полного конвекционного нагрева RO300FC (рис. 2.24) разработана для электронных изделий, чувствительных к режимам с высокой температурой пайки. Вот почему данное оборудование становится оптимальным решением для бессвинцовой и традиционной технологий пайки.



Рис. 2.24. Конвейерная печь конвекционного нагрева RO300FC [37]

Эффективный конвекционный нагрев обеспечивается высоким коэффициентом использования в комбинации со сравнительно малой зоной обслуживания и однородным распределением нагрева по всем зонам печи. RO300FC пригодна для решения всех задач, в частности для оплавления припойных паст, отверждения клея и сушки адгезивов. В печи могут производиться индивидуальная регулировка каждой зоны нагрева и разработка всех типов температурных профилей, что позволяет легко и просто воспроизводить необходимые режимы. Для упрощения процесса настройки режимов пайки печь поставляется с предварительно настроенными стандартными термопрофилями для всех применений в SMT.

Кроме этого, система управления печи позволяет программировать и сохранять индивидуально настроенные режимы для конкретных изделий. С помощью набора «плавающих» термопар и специально разработанного программного обеспечения все процессы могут быть замерены, сравнены и задокументированы.

RO300FC отличается простым управлением, высоким качеством получаемых паяных соединений и надежной конструкцией. Расчеты и опыт эксплуатации показали возможность пайки в RO300FC до 700 штук печатных плат в течение 8-часовой рабочей смены.

Особенности печи RO300FC:

- 100-процентный конвекционный нагрев;
- надежное управление температурными профилями;
- система транспортирования печатной платы (ПП):
 - конвейер сетчатой конструкции,
 - цепной конвейер (стандарт SMEMA);
- вариант исполнения для пайки в инертной среде (опция);
- графическая запись и представление температурных профилей;
- 30 предварительно настроенных профилей для всех SMT-применений;
- 19 профилей для свободного программирования.

Благодаря системе конвекционного нагрева горячим воздухом, предусматривающей две зоны предварительного нагрева (рис. 2.25) и зону оплавления (рис. 2.26), возможно вести пайку паяльными пастами всех типов, в том числе не содержащими свинец, а также пайку изделий, которые требуют высокой точности процесса управления параметрами.

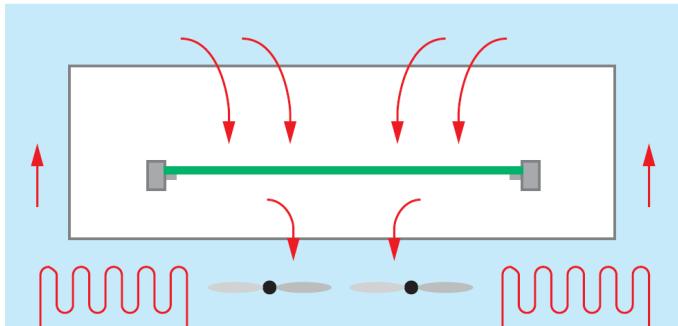


Рис. 2.25. Схема зоны предварительного нагрева [37]

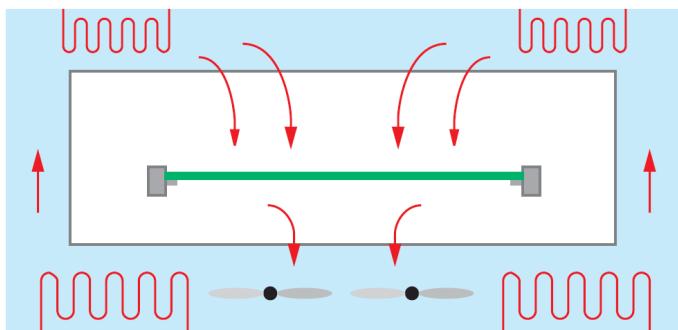


Рис. 2.26. Схема зоны оплавления [37]

Вертикальные потоки горячего воздуха равномерно обогревают собранную печатную плату. Плотный воздушный поток обеспечивает однородный нагрев всех компонентов и самой печатной платы. Такая технология не допускает появления зон перегрева и возникновения теневого эффекта. Равномерное распределение температуры позволяет избежать термических перегрузок, поэтому конвекционная технология приемлема для высокочувствительных материалов. Минимальная разность температур гарантирует высокое качество процесса пайки в любом месте на поверхности печатной платы.

Особенности системы нагрева RO300FC:

- высокий объем воздушной конвекции ($>1200 \text{ м}^3/\text{ч}$);
- эффективный нагрев всего массива ПП;
- отсутствие эффектов тени и «горячего пятна»;
- перепад температуры $<4^\circ\text{C}$ на 300 мм.

Для использования RO300FC в процессах пайки бессвинцовыми материалами в печи поддерживаются требуемая высокая температура и система точного управления температурой в каждой зоне.

Особенности процесса пайки RO300FC:

- три зоны для конвекционного нагрева и одна зона охлаждения;
- индивидуальная регулировка температур каждой зоны;
- программируемая и регулируемая скорость конвейера;
- все профили программируются и сохраняются.

RO300FC может также изготавливаться с цепным конвейером для пайки двусторонних печатных плат и для использования машины в линии SMT. Цепной конвейер обеспечивает регулировку ширины конвейера, программирование скорости, точное позиционирование входа/выхода для систем обработки печатных плат.

Печь также может поставляться в исполнении для пайки изделий в среде инертного газа. В данном случае возможно проведение пайки при более высоких температурах, уменьшение окисления припоя и контактных поверхностей, увеличение скорости смачивания жидким припоеем, использование менее активных флюсов и как следствие – снижение возможной коррозии.

С моделью RO300FC дополнительно может поставляться специальное программное обеспечение RO-CONTROL. Данное программное обеспечение применяется для моделирования температурных профилей с учетом различных установок печи и предоставляет возможность сравнивать смоделированные профили со справочными данными из библиотеки профилей различных припойных паст. Применение данного программного обеспечения позволяет достичнуть эффективного подбора установок печи для получения требуемого термопрофиля, параметры которого могут быть оптимизированы и улучшены без потерь времени и затрат материалов на проведение тестовых паяк. Программа моделирования термопрофиля рассчитывается исходя из значений температур каждой зоны, скорости конвейера и постоянных параметров печатной платы.

Для этого существует библиотека паяльных паст, информация которой дополняется пользователем по мере ее эксплуатации. Программное обеспечение включает объемную библиотеку профилей – ее можно модифицировать до неограниченного количества

программ. Этот программный модуль подключается к печи оплавления через ПК и имеет полное управление над машиной.

Реальная температура на печатной плате измеряется с помощью двух термопар, устанавливаемых совместно с указанным программным обеспечением, и результат измерений графически отображается на мониторе персонального компьютера (рис. 2.27). Сравнение термопрофиля, смоделированного ранее, с исходным термопрофилем из библиотеки паст производится путем наложения.

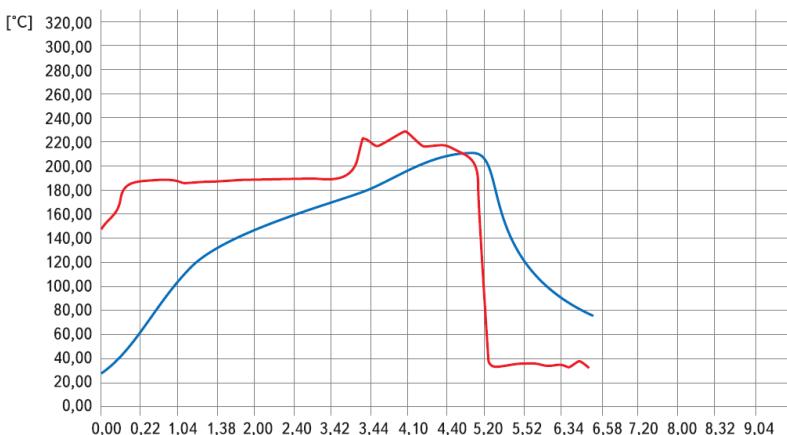


Рис. 2.27. График, на котором сравниваются термопрофили [37]

Особенностью работы печи RO300FC является необходимость постоянной вытяжки отработанного газа из рабочего объема. Печь может подключаться к уже имеющейся системе вытяжки производственного участка. Возможно приобретение дополнительного устройства – специальной вытяжной вентиляционной системы RO300FC-VNT (рис. 2.28). Такое устройство состоит из гибких воздуховодов и системы вентиляции.

Использование системы вытяжки RO300FC-VNT обеспечивает эффективное охлаждение кожуха печи (ниже 40 °C); резкое разделение зон нагрева (разница температур между зонами – свыше 120 °C); полное удаление дыма (газа) для защиты окружающего пространства.

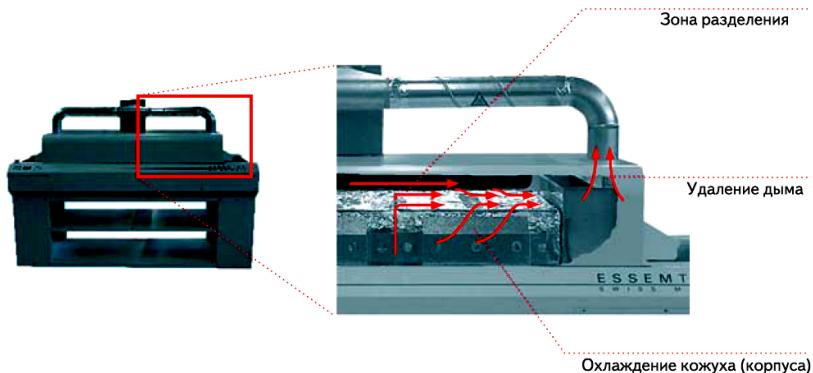


Рис. 2.28. Система вытяжки RO300FC-VNT [37]

Анализ описанных вариантов печей для пайки показывает, что они представляют собой сложнейший комплекс оборудования. Соответственно, вес печи OmniFlex7 составляет 1796 кг при длине зоны нагрева 2654 мм, вес печи OmniFlex10 – 2636 кг, при длине зоны нагрева 3759 мм. Печи немецкой компании SEHO также отличаются значительным весом. Так, печь GoReflow 1.8 при общей длине 3200 мм весит 880 кг, печь GoReflow 2.3 при общей длине 3700 мм весит 970 кг.

Выше было сказано, что при низкотемпературной пайке передача тепла реализуется в основном механизмом конвекции. Однако есть печи, где реализован и инфракрасный метод нагрева.

Совершенно очевидно, что результат применения технологии поверхностного монтажа в основном зависит от качества финишного этапа – оплавления припоя, выполняемого в паяльной печи.

Важнейшими факторами качественной пайки при объемном нагреве являются способ нагрева, равномерность распределения температуры по поверхности рабочей зоны печи, а также возможность проведения пайки по заданному температурному профилю.

Существует два основных способа нагрева плат в процессе пайки в паяльных печах – инфракрасный и конвекционный. Каждый способ имеет свои преимущества и недостатки, поэтому вполне естественно, что наиболее перспективным является одновременное применение, или совмещение, обоих способов нагрева в одной

печи, что реализовано в АПИК 1.0 (рис. 2.29) производства российской компании «Аверон», г. Екатеринбург.



Рис. 2.29. Печь АПИК 1.0 [38]

Равномерность распределения температуры по рабочей зоне важна для получения качественных паяных соединений, снижения вероятности повреждения элементов и печатных плат в результате перегрева или деформаций при тепловом расширении.

Современные паяльные пасты требуют проведения пайки по определенному температурному профилю с заданием на разных стадиях процесса определенной температуры, времени выдержки и скорости нагрева. В АПИК 1.0 наряду со стандартным термопрофилем реализован так называемый ускоренный термопрофиль. Принципиальное их отличие заключается в том, что для стандартного термопрофиля производится нагрев с максимальной скоростью и выдержками на температурах активации флюса и плавления

припоя; для ускоренного термопрофиля скорость нагрева задается для каждого участка, при этом выдержек не требуется.

Термопрофили, обеспечивающие пайку все более широко применяемыми припоями без свинца, также реализуются в печи АПИК 1.0. Задаваемая температура нагрева устанавливается до величины 260 °C, что позволяет производить пайку как традиционных припоев, так и припоев, не содержащих свинца, причем без потери равномерности нагрева по требуемому объему.

Нагрев плат реализуется четырьмя кварцевыми галогеновыми лампами и трубчатым воздушным нагревателем. Встроенный вентилятор обеспечивает оптимальную передачу и равномерное распределение тепла по поверхности плат, а термотракт с термопарой – поддержание установленных по программе температур. На задней стенке печи расположен вытяжной вентилятор, к которому можно подсоединить внешнюю систему дымоудаления.

Смотровое окно на передней панели печи позволяет визуально контролировать процесс пайки, что является немаловажной особенностью и необходимостью при отработке термопрофиля и термопроцесса.

Пульт с большим графическим дисплеем поддерживает как русскоязычный, так и англоязычный интерфейс диалога с оператором и имеет обратную связь с термокамерой (это позволяет в реальном времени контролировать термопроцесс и иметь возможность приостановки, корректировки или прерывания исполняемой программы пайки). Встроенная справочная система подскажет правильную последовательность операций и назначение мультифункциональных кнопок.

Энергонезависимая память хранит до 50 различных стандартных и 50 ускоренных термопрофилей (контроль по скорости нагрева). Наличие большого количества программ в памяти печи позволяет иметь достаточно широкую номенклатуру термопроцессов и легко менять их одним нажатием кнопки, что экономит время и дает возможность без потерь сохранять до 100 видов термопрофилей.

Дополнительная термопара, входящая в комплект поставки АПИК 1.0, используется при отработке термопроцесса на новых платах и платах с термочувствительными элементами. Ее достаточ-

но закрепить в месте платы, где необходимо знать оценку температуры во время выполнения термопрофиля. Реальное значение температуры, измеренное этим внешним термодатчиком, отображается на дисплее пульта одновременно с показаниями, полученными от внутренней термопары, что упрощает их сравнение, анализ и последующее уточнение параметров термопрофиля.

Кабель сопряжения печи АПИК 1.0 с персональным компьютером и программное обеспечение, поставляемые в комплекте, позволяют графически отображать действительные значения температур в реальном масштабе времени, их отклонения от программных величин, а также полностью документировать весь термопроцесс: от начала пайки и до момента охлаждения. Данная опция востребована предприятиями оборонной промышленности, так как позволяет документально подтверждать весь термопроцесс пайки каждой партии плат.

Печь АПИК 1.0 предназначена для единичного и мелкосерийного производства, ее вес составляет 35 кг при габаритах 470×40×370 мм, при этом максимальный размер плат для данной печи составляет 310×340 мм.

2.4. Оборудование для пайки волной припоя

Применение печей для пайки получает все более широкое распространение. В первую очередь из-за распространения компонентов поверхностного монтажа (SMT-монтажа). Применение волны припоя для получения соединений при данном конструктивном варианте платы нереально. Кроме того, заменители припоя ПОС-61, несмотря на предпринимаемые усилия, пока не достигли по своим технологическим характеристикам припоя ПОС-61.

Тем не менее пайка волной припоя продолжает широко применяться при изготовлении печатных плат. К достоинствам этого метода следует отнести следующие:

- непрерывный поток жидкого припоя гарантирует устранение газовых раковин;
- смывающее действие волны припоя предотвращает наличие флюса на изделии;

— жидкий припой поступает на изделие снизу вверх и всегда бывает чистым.

Традиционно волна припоя характеризуется большой протяженностью и охватывает всю площадь печатной платы, за счет этого формируются сразу все необходимые соединения за один проход. Вместе с тем последнее время размер волны припоя ограничивают специальными устройствами (соплами). Это позволяет выполнять так называемую селективную пайку.

Селективную пайку в последнее время применяют технологии для изделий, которые в силу конструктивных особенностей не дают возможности полностью автоматизировать процесс сборки, применения технологию поверхностного монтажа или технологию пайки волной припоя. На производствах Америки и Европы селективная пайка применяется давно и успешно. Наибольшей популярностью на этих производствах пользуются гибкие, быстропереналаживаемые машины, так как западные производства специализируются в основном на высокотехнологичных изделиях мелкой и средней серий.

В число таких машин входят установки производства английской компании Pillarhouse.

Pillarhouse — одна из первых компаний, которая взяла ориентир на производство установок селективной пайки и стала специализироваться на этом оборудовании. Сегодня ее модельный ряд представлен пятью базовыми установками, имеющими варианты исполнения в зависимости от потребностей производства.

Рассмотрим возможности и особенности модели Orissa.

Orissa — модуль селективной пайки с одной ванной припоя (рис. 2.30). Модуль оснащен конвейерной системой и SMEMA-интерфейсом, поэтому может работать как отдельно стоящая установка селективной пайки, так и в составе линии. При работе в качестве отдельно стоящей машины в комплектацию может входить удлиненный конвейер, выступающий за габарит установки, встроенные узлы нанесения флюса и предварительного нагрева. Также модуль может работать в линии совместно с внешними модулями нанесения флюса и предварительного нагрева или другими модулями селективной или групповой пайки, производимыми компанией Pillarhouse.



Рис. 2.30. Модуль селективной пайки Orissa [39]

Модуль спроектирован для работы с платами размером от 102×102 мм и до 610×610 мм. При этом существует три варианта исполнения:

- Orissa 300: максимальные габариты паяемого изделия – до 305×305 мм;
- Orissa 400: максимальные габариты паяемого изделия – до 305×406 мм;
- Orissa 600: максимальные габариты паяемого изделия – до 610×610 мм.

Все модули Orissa работают одинаково: после загрузки все операции с изделием (нанесение флюса, предварительный нагрев, пайка) производятся при неподвижной плате системами, установленными на подвижной каретке. Такое решение позволяет работать

с большим размером платы, при этом внешние габариты минимальны. Кроме того, это дает возможность избежать необходимости в использовании механизма манипулятора, что сокращает время цикла на операции захвата и постановки платы и процедуры переналадки этого манипулятора (ширина конвейера изменяется автоматически при переходе на новое изделие).

Конвейерная система Orissa (рис. 2.31) состоит из двух рельсов, один из которых (фронтальный) неподвижен.



Рис. 2.31. Конвейерная система [39]

Изменением ширины конвейера можно управлять программно, оно происходит автоматически при подготовке новой программы пайки или загрузке уже существующей. В базовой конфигурации плата удерживается за торец, однако в случае работы с крайне легкими или тонкими платами имеет смысл использовать опцию удержания платы прижимом по верхней кромке. Остановка платы в рабочей позиции осуществляется подвижным остановом. В случае использования машины как отдельно стоящей целесообразно применять опцию «удлиненный конвейер», что позволит удобно и безопасно класть/снимать плату с конвейера без использования внешних конвейеров.

При автономном использовании модуля Orissa можно производить операции нанесения флюса, нагрева и пайки внутри модуля.

Нагрев можно осуществлять несколькими способами. Паяемое соединение прогревают, «поднеся» сопло вплотную под паяемый контакт, теплом, излучаемым расплавом припоя, и разогретым азотом, окружающим сопло.

Возможно использование опции селективного нагрева контактов газом, прокачиваемым через ванну с расплавом припоя и подающимся на плату через патрубок. Третий вариант нагрева паяемой платы – использование инфракрасного нагревателя, расположенного над паяемым изделием (рис. 2.32). В зависимости от габаритов паяемого изделия одновременно может быть включено от одного до четырех нагревателей. Причем верхний нагреватель может быть включен в момент загрузки и выключен по завершении пайки или в любые другие моменты. Работой всех способов нагрева управляют программно.



Рис. 2.32. Инфракрасные нагреватели [39]

На подвижной каретке (рис. 2.33) установлено устройство нанесения флюса.

Устройство «выстреливает» флюс точно в точку будущей пайки, не загрязняя плату и экономно расходуя флюс. Если необходимо нанести флюс на группу контактов, например на выводы разъема, флюс будет нанесен в виде полосы. Однако такая полоса будет нанесена некоторым количеством соединяющихся доз, выстреливаемых со скоростью 50 доз в секунду. Объемом одной дозы управляют программно.

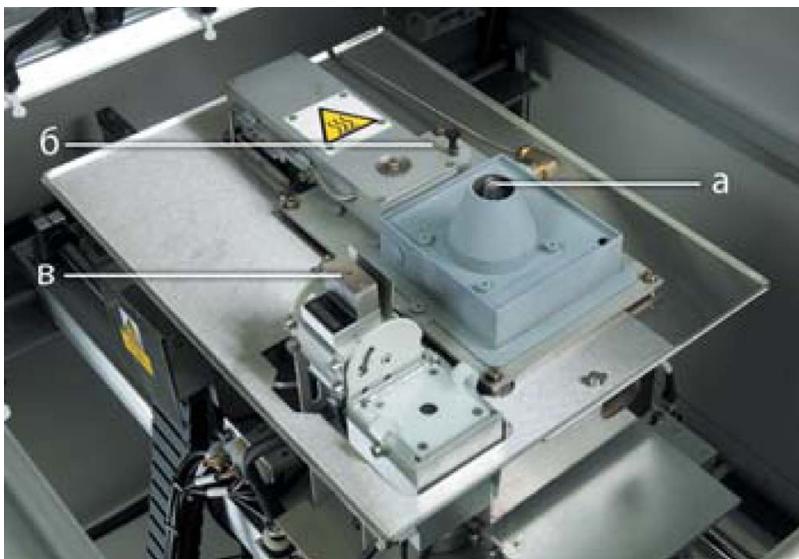


Рис. 2.33. Подвижная каретка: *а* – сопло; *б* – поплавок;
в – устройство нанесения флюса [39]

В некоторых ситуациях форсунку, выстреливающую флюс, наклоняют на некоторый угол (до 45°). Это позволяет наносить флюс ближе к плате, избегая попадания дозы в торец вывода, и сократить машинные перемещения при последовательной пайке контактов (нанесение флюса – пайка, нанесение флюса – пайка...). Флюс подается из емкости, находящейся снаружи модуля и оснащенной датчиком, предупреждающим о низком уровне флюса. Небольшой объем этой емкости упрощает переход с одного флюса на другой, поскольку система позволяет использовать любые типы флюсов.

Кроме устройства нанесения флюса, на подвижной каретке находятся ванна припоя емкостью 5 кг, нагнетающий насос, подающий по магистралям расплав припоя к сменным многоцелевыми соплам AP-типа (All Purpose), и индикатор уровня расплава в ванне.

Модуль Orissa позволяет осуществлять пайку селективно волной припоя при помощи быстросменных сопел. Сопло может быть круглого сечения различных диаметров – от 2,5 до 12 мм. Это универсальные сопла AP для селективной пайки практически любых плат.

Некоторые изделия, особенно это относится к неоптимизированным платам, могут иметь недостаточный диаметр отверстий, вследствие чего в процессе пайки припой плохо заполняет зазоры. В таких ситуациях целесообразно использовать сопла APJet с более мощным потоком расплава в центре наконечника. Наконечники AP и APJet выполняются как в стандартном, так и в исполнении Extended (удлиненный) для случаев, когда необходимо «дотянуться» до труднодоступных мест, например между высокими разъемами.

В ряде случаев целесообразно использовать волнообразователи типа JetTube (рис. 2.34) или JetWave, которые особенно эффективны для пайки групп контактов или разъемов. Сопла выполнены из железа высокой чистоты и облужены с применением специального флюса, что позволяет добиться максимальной равномерности перетекания расплава припоя через край сопла и, как следствие, стабильного качества.



Рис. 2.34. Наконечник JetTube [39]

Упомянутая ранее немецкая компания SEHO разрабатывает также оборудование для пайки волной припоя, например установка пайки волной MWS 2340 (рис. 2.35).

Установка MWS 2340 построена по модульному принципу, что позволяет сконфигурировать систему под конкретные задачи

и наращивать систему по мере увеличения объемов продукции на предприятии.



Рис. 2.35. Установка пайки волной MWS 2340 [40]

Туннель, в котором перемещается печатная плата, выполнен без использования дорогостоящих затворов. На протяжении всего туннеля создана просматриваемая область рабочей зоны (что позволяет оператору визуально контролировать каждый процесс и каждое действие).

MWS 2340 позволяет работать со всеми типами припоев для низкотемпературной пайки. Для специальных задач может быть изменена конфигурация универсальных зон предварительного нагрева (длина с 1800 мм увеличивается до 3300 мм).

Система флюсования обычно встраивается в систему, но может и устанавливаться как отдельно стоящий модуль перед входом в нее, что позволяет еще повысить производительность MWS 2340 и встроить на место флюсователя дополнительный предварительный нагрев.

В базовой комплектации машина имеет систему встроенных фильтров очистки на входе и в зоне выгрузки из системы, которые успешно улавливают конденсат. Также машина может дополнительно оснащаться контролируемой 4-й стадией системы фильтрации, которая встраивается в вытяжную систему.

Другой технической новинкой компании SEHO в системе MWS является встроенный конвекционный модуль охлаждения с контролируемой температурой. Данный модуль охлаждает печатную плату после процесса пайки перед выходом из системы. Это особенно важно при работе на высоких температурах, например, при использовании припоев, не содержащих свинец.

Серии всесторонних испытаний и изучений показали, что быстрое эффективное охлаждение позволяет снизить текучесть припоя в местах паяных соединений и, как следствие, – сохранить форму качественно пропаянной галтели.

Важным преимуществом системы MWS 2340 является система подачи припоя в каналы пайки. За счет применения микропроцессора нет необходимости в замене насадок и регулировке температуры припоя в процессе работы, а расстояние между волной и печатной платой в этом случае остается постоянным.

Компанией SEHO для пайки в среде азота разработан туннель с особой геометрией, который практически не требует обслуживания. Газовые сопла в зоне пайки заполняют систему азотом, который, в свою очередь, вытесняет кислород из рабочих зон (рис. 2.36). На входе и выходе из машины кислород и продукты испарения удаляются вытяжкой.

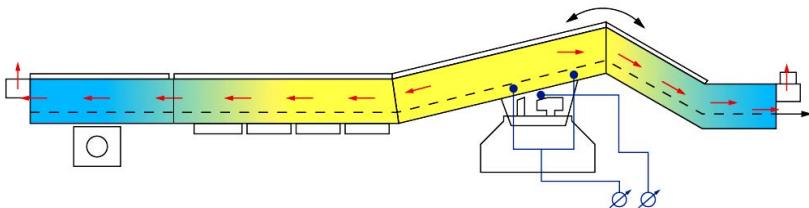


Рис. 2.36. Туннель для пайки в среде азота [40]

Преимущество применения азота заключается в низком содержании кислорода в рабочей зоне, благодаря чему образуется меньше окислов. Расход азота составляет приблизительно $15 \text{ м}^3/\text{ч}$, а содержание кислорода – ниже 100 промилле.

Подробнее рассмотрим каждый из этапов технологии групповой пайки волной припоя.

Система может оснащаться различными системами флюсования. Стандартно в MaxiWave 2340 устанавливается встроенный модуль ATS спрей-флюсования с локальным выхлопом из модуля против образования тумана и загрязнения в пределах всей рабочей области (рис. 2.37). Спрей-флюсователь равномерно наносит флюс по заданной длине и ширине печатной платы.



Рис. 2.37. Модуль флюсования [40]

При применении спрей-флюсователя снижаются расход флюса и, как следствие, затраты на расходные материалы. ATS спрей-флюсователь предназначен для работы со спиртосодержащими флюсами, однако возможна работа с флюсами на водной основе, достаточно установить специальную спрей-насадку.

При контроле с персонального компьютера возможно нанесение флюса с высокой точностью и при максимальной производительности. Если есть необходимость одновременного применения в одной системе двух различных флюсов, возможна установка двух спрей-насадок, интегрированных в систему. Имеется возможность

установки системы дозирования флюса, подача которого программируется и контролируется с персонального компьютера.

Флюсователь может быть установлен как в самой системе (базовая комплектация), так и в виде внешнего модуля, устанавливаемого перед входом в систему. В данном случае любое загрязнение рабочей камеры остатками флюса полностью исключено, что также оказывается на снижении текущих эксплуатационных затрат.

Преимущества применения ATS спрей-флюсователя:

- невысокие требования к качеству флюса;
- уменьшение затрат;
- быстрая установка на систему MWS 2340;
- низкие требования к техническому обслуживанию;
- спрей-головки для традиционных флюсов или флюсов на водной основе;
- закрытая система;
- отсутствие выделения паров спирта;
- регулируемые и измеряемые дозировка и давление спрея;
- функция программирования дозирования флюса;
- возможность установки двух головок для распыления флюса.

Этап предварительного нагрева важен при пайке печатных плат волновой припоя. От того, как будет прогрета печатная плата и с какой скоростью она будет проходить по конвейеру в зонах нагрева, зависит конечный результат пайки. Печатные платы со сложной топологией и присутствием на них дорогостоящих компонентов нуждаются в тщательном равномерном предварительном нагреве. В этом случае, как правило, установка MWS 2340 комплектуется конвекционными модулями нагрева общей длиной более 2000 мм. Область предварительного нагрева состоит из шести зон общей длиной 1800 мм. Стандартно MaxiWave 2340 оснащается зонами нагрева посредством инфракрасных нагревателей, но есть возможность замены на кварцевые нагреватели или модули конвекции. Кроме того, благодаря модульной системе построения установки длину зон предварительного нагрева можно увеличить до 3300 мм.

Сопла, а также все части, которые контактируют со сплавом, интегрированы в паяльную ванну. Причем даже полностью загруженная ванна с припоеем может регулироваться и быстро вынимать-

ся из системы. Эту функцию специалисты SEHO реализовали после появления на рынке бессвинцовых материалов. Теперь при переходе с бессвинцового припоя на свинецсодержащий и наоборот пользователю не требуется каждый раз подготавливать ванну к другому присадочному материалу. Достаточно воспользоваться возможностью быстрой замены и регулировки ванны – при этом снижаются потери времени на переналадку системы.

Важной является также возможность быстрой замены паяльного сопла, которое может устанавливаться для SMT, THT или смешанного монтажа. При больших объемах производства рекомендуется устанавливать сдвоенную паяльную ванну (два сопла). Она может использоваться для разных задач:

- при пайке различных серий печатных плат будет автоматически включаться одно сопло, соответствующее типу монтажа продукта (THT, SMT или смешанный монтаж);
- второе сопло может использоваться в качестве второй волны припоя, которая «слизывает» остатки припоя с печатной платы после пайки на первом сопле. Данная технология позволяет свести к минимуму образование мостов и перемычек на печатной плате.

И, конечно, следует обращать внимание на покрытие узлов пайки специальным материалом. От этого зависят их долговечность и, как следствие, работоспособность всей системы. При появлении на рынке более агрессивных бессвинцовых присадочных материалов компания SEHO совместно с научными институтами и промышленными организациями разработала специальное покрытие, которое успешно защищает все части установок от химических реакций, которые возникают при применении бессвинцовых сплавов. Это прогрессивное бессвинцовое покрытие используется уже в течение нескольких лет и зарекомендовало себя как хорошая защита систем пайки.

2.5. Паяльные станции

В ГОСТ Р 55491–2013 «Платы печатные. Правила восстановления и ремонта» указано, что «модификация, доработка и ремонт печатных плат являются очень трудоемким и сложным процессом, не поддающимся автоматизации и зависящим от навыков оператора, применения надлежащих инструмента, оборудования и материалов, многие из которых применяются только для процессов ремонта». С учетом изложенного разработчики оборудования для ремонта печатных плат создают системы, включающие целые комплексы оборудования.

Например, система ERSA IR/PL650 – новая разработка фирмы ERSA, предназначенная для ремонта печатных устройств. Система представляет собой третье поколение систем инфракрасной пайки, в котором применены три новых технологических решения: система нагрева DynamicIR, система контроля температуры с обратной связью MTCL и система бесконтактного измерения температуры IntelligentIRS. Используя накопленный опыт эксплуатации более чем 5000 установок инфракрасной пайки по всему миру, специалисты компании создали систему ERSA именно для работы со сложными компонентами и печатными платами большого размера (460×560 мм) по бессвинцовой технологии.

К преимуществам систем инфракрасной пайки ERSA следует отнести простоту применения, высокую производительность.

При бессвинцовой пайке температура процесса оказывается выше на 30–40 °С по сравнению с традиционной пайкой с применением свинецсодержащих припоев. Поэтому максимально допустимая рабочая температура для большинства компонентов поверхностного монтажа (SMT) находится в диапазоне от 250 до 260 °С, а печи конвекционной пайки и ремонтные центры работают в узком рабочем диапазоне, в опасной близости от предельных значений для компонентов и печатных плат. Данный факт обуславливает значительное повышение требований к системе нагрева при ремонте. Для качественного выполнения ремонтных операций должно быть обеспечено равномерное распределение тепла по поверхности печатного узла.

Неравномерное распределение тепла по поверхности компонентов осложняет выполнение процесса ремонта по бессвинцовой технологии. Пайка припоем без содержания свинца (LF – lead-free) является более сложной вследствие повышенной температуры пайки.

Процесс ремонта паяных соединений для бессвинцовой пайки зависит от следующих факторов:

- максимально допустимая температура компонента не должна превышать 260 °C при скорости нагрева 2–4 °C/c; градиент охлаждения: 4–8 °C/c;
- минимальное значение разности температур и возможность работы внутри заданного диапазона;
- характеристики флюса; условия смачивания; поведение компонента и печатной платы во время смачивания;
- температура отслаивания и искривление печатной платы.

Равномерное распределение тепла по поверхности компонента предоставляет возможность работы внутри заданного диапазона температур по бессвинцовой технологии.

Технология ремонта требует обеспечения хорошего контроля температуры, малого перепада температур и высокого коэффициента передачи тепла.

Этого можно достичь при помощи технологии инфракрасного нагрева: усовершенствованное управление уровнем нагрева, которое гарантирует равномерное распределение тепла по поверхности компонента в сочетании с более низкой температурой пайки. Конвекционное оплавление соплом малого диаметра не может обеспечить равномерный нагрев компонента, в то время как поток воздуха из сопла большего диаметра будет воздействовать на рядом стоящие компоненты.

Поскольку принудительная конвекция в открытом сопле с горячим воздухом является процессом более сложным для управления и полностью отличается от нагрева в конвекционной печи, инженеры ERSA решили применить инфракрасное излучение средней длины волн в качестве рабочей среды для передачи тепла в процессе пайки и ремонта.

Приведенные на рис. 2.38 и 2.39 результаты тестов распределения тепла показывают отличие температур для корпусов BGA при применении различных методов нагрева.

Применение системы нагрева с обратной связью и точным поддержанием температуры Multiple True Closed Loop (MTCL) и нагрев инфракрасным излучением с контролем температуры DynamicIR обеспечивает равномерное распределение тепла, минимальную разность температур по всему корпусу BGA, оптимальный градиент охлаждения и минимальное общее время выполнения цикла ремонта.

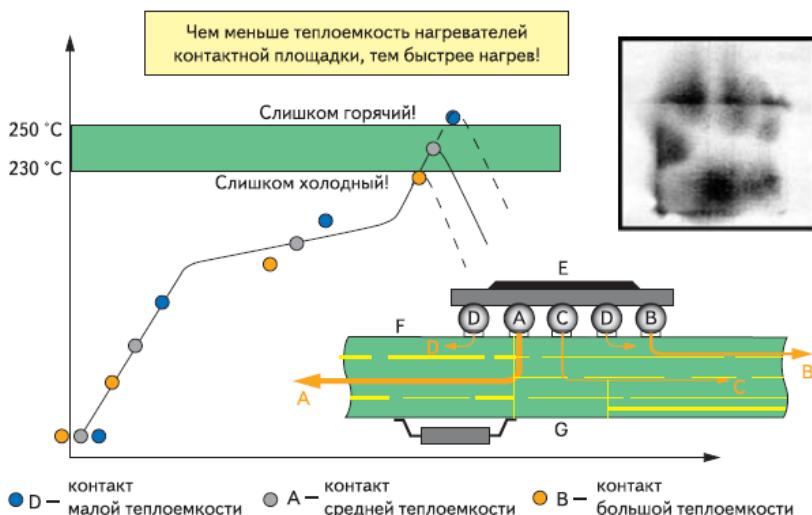


Рис. 2.38. Холодные и горячие области на нагреваемой поверхности при неравномерном нагреве [41]

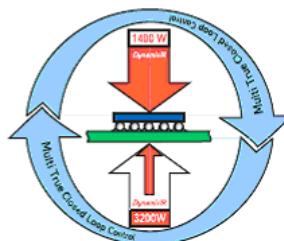
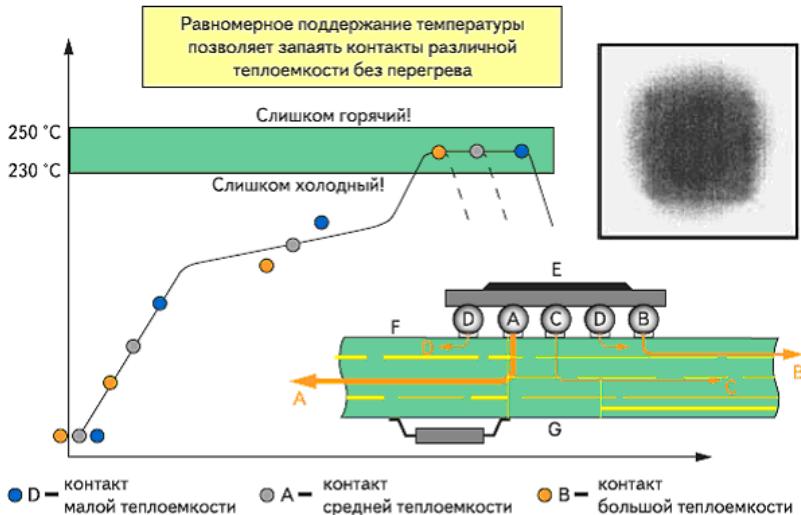


Рис. 2.39. Избирательный нагрев обеспечивает равномерное распределение температуры [41]

Технология ERSA, MTCL система нагрева с обратной связью (рис. 2.40) и точным поддержанием температуры и DynamicIR используют фактическую температуру компонента для запуска процесса нагрева. Бесконтактный датчик IntelligentIRS обеспечивает точное измерение температуры во время процесса пайки. Четыре дополнительных датчика AccuTC – новое поколение термопар K-типа, они предотвращают нежелательный перегрев компонентов.

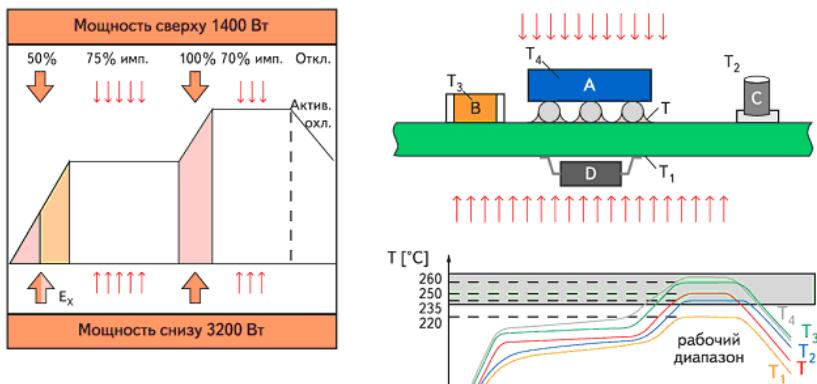


Рис. 2.40. Управление нагревом с обратной связью [41]

Технология нагрева DynamicIR обеспечивает процесс пайки с точным поддержанием температуры. Мощность верхнего нагревателя составляет 1600 Вт с возможностью включения нескольких зон по поверхности для различных размеров компонентов. Мощность нижнего нагревателя – 4600 Вт, в нем также предусмотрена возможность включать различные зоны нагревателя для разных размеров печатных узлов.

Принцип работы системы DynamicIR заключается в поддержании определенной температуры платы и компонента, что является основной задачей во время процесса пайки. ERSA решает проблему ремонта сложных печатных узлов абсолютно новым способом, который применяется в системе IR650 (рис. 2.41).

Технология DynamicIR обеспечивает полностью автоматическое управление инфракрасными нагревательными элементами верхней части (1400 Вт/60×120 мм) и нижней части (3200 Вт/350×450 мм) в зависимости от фактической температуры компонента и изменения его температуры по ходу процесса.

Общая мощность системы пайки распределяется между 4 переключаемыми нагревательными зонами в верхней части и 5 зонами в нижней. В зависимости от размера платы, ее теплоемкости и размеров компонента технология DynamicIR гарантирует, что требуемая тепловая энергия будет передана в нужное место, чтобы компонент и плата точно следовали заданному температурному профилю.

В результате это позволяет минимизировать разность температур поверхностей компонентов и значительно снизить деформацию печатной платы.

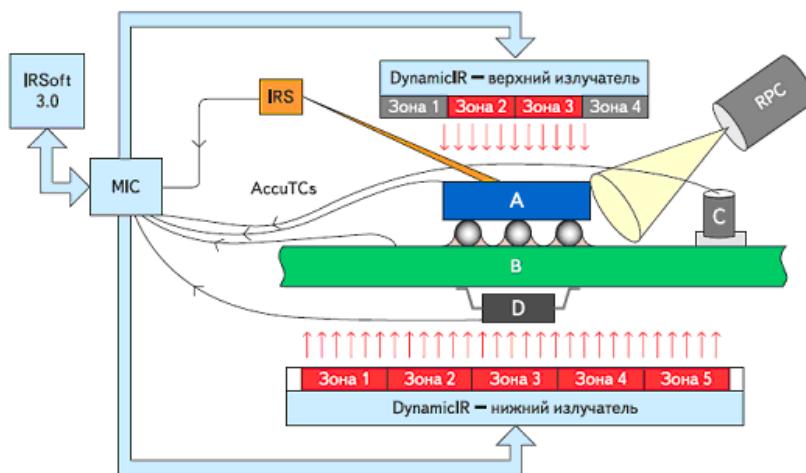


Рис. 2.41. Схема процесса точного поддержания температуры с обратной связью: А – компонент; В – печатная плата; С – компонент на верхней стороне ПП; Д – компонент на нижней стороне ПП; AccuTCs – термопары (4 шт.);

IntelligentIRS – новый инфракрасный датчик температуры; верхний излучатель DynamicIR – верхняя часть инфракрасного излучателя (4 зоны); нижний излучатель DynamicIR – нижняя часть инфракрасного излучателя (5 зон); RPC – камера визуального контроля процесса пайки; IRSsoft 3.0 – программное обеспечение и документация; MIC – микропроцессорная система управления системой нагревания DynamicIR [41]

Принцип работы системы поддержания температуры с обратной связью (MTCL) обеспечивает точное поддержание температуры платы и компонента. Это является главным преимуществом систем инфракрасной пайки ERSA. Поддержание температуры с обратной связью (MTCL) означает, что фактическая температура компонента считывается бесконтактным инфракрасным датчиком (IRS), который является основным контролирующим узлом системы нагрева.

Новая система IntelligentIRS позволяет проводить более точное измерение температуры, выбрав компонент из базы данных или

его цвет, что даст системе поправочный коэффициент для точного измерения температуры.

Для проведения измерений можно выбрать датчик IRS или термопару, тем самым гарантируется соответствие заданным характеристикам термопрофиля в течение процесса ремонта. При помощи дополнительных термопар системы DynamicIR можно предотвратить нежелательный перегрев смежных или расположенных с обратной стороны компонентов. Таким образом, хороший результат гарантировается с первого раза.

Управление поддержанием температуры становится ключевым компонентом обеспечения безопасного процесса пайки. Однако высокая рабочая температура и узкий рабочий диапазон усложняют данный процесс. Риск перегрева смежных или находящихся на обратной стороне компонентов существенно возрастает. Технологии DynamicIR и управление с обратной связью с точным поддержанием температуры (MTCL) исключают перегрев чувствительных компонентов печатных плат. Соответственно, работа за пределами рабочего диапазона становится невозможной.

Ремонтная станция ERSA IR/PL650 состоит из пяти модулей (рис. 2.42):

- IR650A – паяльно-ремонтный центр с инфракрасным подогревом;
- PL650A – устройство позиционирования и прецизионной установки микросхем;
- RPC – камера наблюдения за оплавлением;
- IRSof – программное обеспечение для контроля и управления работой системы;
- Digital 2000A – микропроцессорная паяльная станция.

Помимо этого, станция оснащена вакуумным пинцетом, предназначенным для захвата компонентов.

Все модули паяльной станции представляют собой законченный функциональный блок, расположенный на одной станине. Перемещение печатного узла между зонами (модулями) осуществляется с помощью подвижной рамки, в которую плата устанавливается перед работой. Вся работа по ремонту платы осуществляется в пределах одного рабочего места. IR650A – модуль, где непосредственно осуществляется пайка (рис. 2.43). Его состав и принцип работы описаны выше.



Рис. 2.42. Общий вид ремонтной станции ERSA IR/PL650 [41]



Рис. 2.43. Модуль IR650A [41]

PL650A – второе поколение модулей точной установки, разработано для широкого диапазона компонентов (размером от 1×1 до 60×60 мм), полностью автоматизирован, обеспечивает высокую точность установки компонентов. Камера с высокой разрешаю-

щей способностью с автоматической фокусировкой и увеличением до 300 крат позволяет точно совмещать выводы компонентов с контактными площадками печатной платы.

Высокое качество изображения поддерживается при помощи высококонтрастной раздельно управляемой двухцветной свето-диодной системы, обеспечивающей подсветку с четырех сторон. Полуавтоматическая установка микросхем гарантирует высокую точность и стабильность установки.

Характеристики модуля PL650A:

- высококачественная ПЗС-камера (25-кратное оптическое + 12-кратное цифровое масштабирование);
- продольное перемещение всех компонентов при помощи электропривода;
- функции «Автоматическое поднимание» и «Автоматическое опускание»;
- двулучевая оптика 60×60 мм;
- автоматизированное масштабирование и фокусировка;
- подсветка с четырех сторон при помощи красных/белых свето-диодов;
- упрощенная настройка автофокуса, баланса белого;
- программируемые предварительные установки камеры.

К основным компонентам модуля RPC относятся новая камера с автоматической фокусировкой (с увеличением до 300 крат), управляемая кольцевая светодиодная система подсветки и подвижный штатив (рис. 2.44), который обеспечивает наблюдение за процессом пайки даже самых мелких компонентов под любым углом.

Характеристики модуля RPC:

- высококачественная ПЗС-камера (25-кратное оптическое + 12-кратное цифровое масштабирование);
- автоматическое увеличение и фокусировка;
- кольцевая светодиодная подсветка;
- упрощенная настройка автофокуса, баланса белого;
- программируемые предварительные установки камеры;
- многоугольный передвижной штатив;
- система удаленного управления при помощи программной среды IRSof 3.0.



Рис. 2.44. Камера с автоматической фокусировкой [41]

ERSA IRSof 3.0 – система управления и документирования процесса пайки:

- дистанционное управление устройствами IR650A (RPC), PL650A, а также IR550A plus;
- четко структурированный интерфейс оператора;
- регистрация и отображение всех данных процесса пайки;
- визуальное отображение процессов PL и RPC в программном окне;
- банк данных профилей и значений характеристик компонентов инфракрасных датчиков;
- поддержка операционных систем Windows 2000 и XP.

Второе поколение программной платформы управления процессом пайки обладает высоким уровнем гибкости, надежности и комфорта работы. Как и универсальная программная сре-

да управления, регистрации и визуализации работы всех систем ERSA IR/PL650A и IR550A plus, IRSof 3.0 разработана прежде всего с учетом комфорта работы оператора. Данное программное обеспечение позволяет упростить процедуру демонтажа компонентов и/или ремонта, состоящую из трех этапов. Можно использовать установки профилей по умолчанию для выполнения различных операций (для демонтажа/монтажа как по обычной, так и по бессвинцовой технологии). Все рабочие данные системы о заданном профиле пайки записываются и хранятся вместе с фактической температурной кривой, чем гарантируется стабильность работы системы вне зависимости от оператора.

ERSA IRSof 3.0 предусматривает защищенный паролем доступ к системе инфракрасной пайки. Рабочее состояние модуля отображается в окне состояния. Процесс пайки записывается в виде AVI-файла параллельно с построением фактического температурного профиля.

Все данные процесса пайки, предустановленный профиль, фактические температурно-временные кривые и все рабочие состояния хранятся в одном файле. Документированные данные о процессе можно вывести в виде детального отчета в наглядной форме. IRSof 3.0 обеспечивает функцию анализа для последующей оценки записанных рабочих данных, например автоматизированный анализ соотношения роста и уменьшения температуры. Кроме того, все рабочие данные можно экспорттировать в формат Microsoft Excel.

Digital 2000A – микропроцессорная паяльная станция с диапазоном температур 50–450 °C, оснащенная универсальным паяльником ERSA TechTool для контактной пайки.

Демонтаж микросхем на установке выполняется в следующей последовательности. На подвижную рамку устанавливается плата с микросхемой, которую нужно выпаять (рис. 2.45). В зоне оплавления осуществляется центрирование с помощью лазера. Включаются верхний и нижний обогреватели. RPC-камера ведет наблюдение за процессом оплавления.

При начале оплавления из верхнего нагревателя опускается вакуумная насадка и устанавливается на поверхности микросхемы. После того как припой расплавится, вакуумная насадка, удерживая компонент, поднимается вверх. Микросхема выпаяна.



Рис. 2.45. Демонтаж микросхемы [41]

Порядок работы при установке микросхемы следующий. Перед установкой микросхемы на контактные площадки платы должен быть нанесен флюс или паяльная паста. Плата устанавливается на подвижную рамку и крепится фиксаторами. Микросхема укладывается в специальную подложку. Затем происходит забор микросхемы из подложки: опускается голова PL650, захватывает микросхему вакуумной насадкой и вместе с ней возвращается в исходную позицию. Таким образом, микросхема оказывается поднятой над платой. Между платой и камерой выдвигается оптическая головка, через систему зеркал которой можно на мониторе наблюдать выводы микросхемы и контактные площадки платы (рис. 2.46). С помощью микрометрических винтов осуществляется визуальное совмещение контактных площадок с выводами. После достижения максимального совмещения оптическая головка возвращается назад, а голова опускает микросхему на плату и устанавливает ее. Далее подвижная рамка с платой передвигается в зону пайки, включается соответствующий термопрофиль и после истечения установленного времени (несколько минут) раздается звуковой сигнал. Пайка завершена.

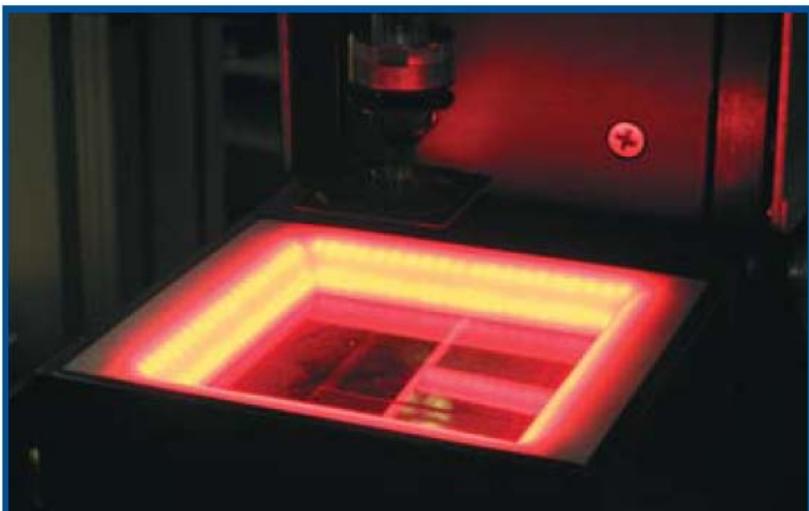


Рис. 2.46. Совмещение с помощью оптической головки [41]

Можно сделать вывод, что работа на новой станции IR/PL650 не представляет особых трудностей. Операторы даже с начальными навыками работы на компьютере и с высокотехнологичным оборудованием могут без труда управлять этой паяльно-ремонтной станцией. Она удовлетворяет наиболее жестким требованиям по пайке и проста в работе.

Отличительной особенностью паяльных станций серии Advanced фирмы JBC является возможность поддержания стабильной температуры наконечника паяльника. Согласно требованиям стандарта 107.460.092.024–93 «Пайка электромонтажных соединений радиоэлектронных средств. Общие требования к типовым технологическим операциям» при пайке электромонтажных соединений радиоэлектронных средств температура наконечника паяльника должна составлять от 250 до 280 °C.

Однако монтажник при работе на паяльной станции с припоеем типа ПОС 61, температура плавления которого составляет 180 °C, устанавливает, как правило, повышенную температуру – 300 °C, даже до 350 °C.

Это обусловлено следующей технической проблемой. Температура на конце наконечника будет отличаться от задаваемой ре-

гулятором даже у новых паяльников. Причем отличие может быть достаточно большим. У одних паяльников это происходит из-за отсутствия плотного прилегания наконечника к поверхности нагревателя, что необходимо для обеспечения максимальной поверхности контакта и, соответственно, теплоотдачи. В процессе пайки пары флюса оседают на внутренней поверхности нагревателя и создают дополнительную теплоизоляцию между поверхностью наконечника и нагревателя, в результате чего происходит падение температуры на конце наконечника. У других термопара расположена достаточно далеко от точки пайки, чаще всего на нагревателе, поэтому возникают высокая инерционность и, как следствие, большая разница в показаниях температуры на блоке управления и на наконечнике паяльника.

С учетом изложенного приходится устанавливать регулятором завышенные значения температуры для получения необходимой температуры на наконечнике.

Рассмотрим паяльник, у которого сменные наконечники надеваются сверху на керамический нагреватель и фиксируются. В данном случае также невозможно обеспечить плотное прилегание поверхности наконечника к поверхности нагревателя, вследствие чего существуют тепловые потери. Возникает большая инерционность из-за того, что охлаждение внешней поверхности наконечника происходит быстрее, чем охлаждение внутреннего пространства, существующего между нагревателем и поверхностью наконечника.

Таким образом, температура на наконечнике не является постоянной величиной – стоит заменить наконечник, немного повысить или понизить температуру, и на выходе мы получаем ее значение – выше или ниже заданного. Если температура выше заданного, могут перегреться компоненты платы и выйти из строя или произойдет отслоение контактной площадки. Если температура ниже заданного, то возможны непропаи. Существенное значение также имеет скорость, с которой паяльник сможет восстановить потерянную теплоту, осуществив пайку. Это весьма актуально в настоящее время, когда увеличивается плотность монтажа при общей тенденции – миниатюризации модулей.

Испанская фирма JBC пошла по пути внедрения системы микропроцессорного управления на свое паяльное оборудование. При этом становится возможным:

- осуществлять пайку при температуре 280 °C, не завышая температуру;
- точно следовать технологическому процессу;
- осуществлять аккуратный, качественный монтаж;
- точно контролировать температуру наконечника;
- производить любые по сложности монтажные работы.

Помимо внедрения микропроцессорной системы управления, наконечники конструктивно выполнены в виде единого модуля, который сочетает в себе и нагреватель, и термопару. Отсутствуют зазоры, в которых скапливаются грязь, воздушные прослойки и т. п. В результате обеспечиваются высокая теплопроводность и точность поддержания температуры.

В некоторых случаях монтажники, для того чтобы выполнить работу быстрее, завышают температуру. Для того чтобы монтажник не менял температурный режим, JBC предлагает отдельный модуль — программатор AC 2600 (рис. 2.47).



Рис. 2.47. Программатор AC 2600 [42]

Данный модуль позволяет станции JBC запрограммировать на нужную температуру – и без программатора будет невозможно что-либо изменить. Даже при попытке изменения температуры на станциях с аналоговым задатчиком вращение лимба не даст никаких результатов, температура меняться не будет. Программирование температуры происходит с точностью до градуса. Если рассмотреть системы, в основе которых лежат ферромагнитные свойства материала (которые ограничивают температуру нагрева наконечника, то есть постоянно работая только при какой-то фиксированной температуре), то можно увидеть, что при работе с наконечником одного типоразмера вам приходится иметь хотя бы два наконечника, рассчитанных на различную температуру, так как, например, при наконечнике, рассчитанном на температуру 260 °C, вы не сможете пропаять достаточно теплоемкие соединения, и нужно использовать наконечник с температурой 330 °C. Зато при работе только с наконечником, рассчитанным на 330 °C, возникает риск перегрева и повреждения либо компонента, либо платы.

Ситуация ухудшается при переходе на бессвинцовую технологию пайки. С одной стороны, наконечник, который предназначен для пайки традиционным припоем, не обеспечит пайку высокотемпературным припоем – не будет прогрето должным образом паяное соединение. С другой стороны, бессвинцовая технология пайки – это повышенные рабочие температуры наконечника. Рабочая температура пайки близка к критической температуре, которую может выдерживать компонент и печатная плата, а следовательно, большое значение имеют точность поддержания температуры и ее стабильность.

Качественное отличие оборудования JBC от всего другого паяльного оборудования – полное микропроцессорное управление температурой и мощностью. В ходе пайки для поддержания постоянной температуры плавления припоя в зависимости от теплоемкости соединения мощность будет варьироваться. Микропроцессор, снимая показания температуры со скоростью 100 измерений в секунду, подбирает необходимую мощность, которую надо подать на нагреватель для обеспечения необходимой температуры на наконечнике. То есть микропроцессор за доли секунды вычисляет скорость падения температуры (градиент охлаждения)

и, подавая необходимую мощность, создает градиент нагрева, обратный охлаждению. Поэтому гарантируется со 100-процентной точностью качество паяных соединений при стандартных 280 °С. Инерционность системы сведена к нулю, так как масса нагревателя, встроенного в каждый картридж-наконечник, очень мала, и с высокой точностью контролируется температура, получаемая на конце рабочей части наконечника. Обратите внимание: речь идет не о точности поддержания температуры на нагревателе (как в других системах), а о точности поддержания температуры на конце рабочей части наконечника.

К дополнительным преимуществам оборудования JBC следует отнести следующие. Рабочее расстояние от точки пайки до места удерживания паяльника составляет 30 мм для паяльника 2210 (при диаметре картриджа 3 мм) и 40 мм для паяльника 2245 (при диаметре картриджа 4 мм). Это позволяет осуществлять монтаж в труднодоступных местах и производить пайку с высокой точностью, так как таким паяльным инструментом намного удобнее производить паяльные работы – меньше напряжение для руки (рис. 2.48).



Рис. 2.48. Общий вид паяльника 2245 [42]

Данные паяльники являются самыми миниатюрными, эргономичными и легкими. Паяльники удобно держать, в конце смены монтажник не чувствует усталости. Сегодня это особенно актуально, когда производительность при гарантированном качестве выходит на одно из первых мест.

Следующее преимущество – широкая номенклатура наконечников (более 70 различных видов) – позволяет решать любые монтажные задачи. Специально разработаны модели наконечников для пайки компонентов QFP и PLCC, которые обеспечивают наиболее удобную работу с микросхемами (рис. 2.49).



Рис. 2.49. Наконечники паяльников [42]

Подводя итоги, можно сформулировать следующие преимущества данной системы в отличие от других паяльных систем:

- соответствие температур на блоке управления и на наконечнике;
- точное поддержание температуры рабочей части наконечника;
- микропроцессорное управление;
- возможность фиксации любой температуры с защитой от последующего ее изменения;
- широкий выбор наконечников для паяльного инструмента;
- возможность выполнения разнообразных видов работ по монтажу и демонтажу компонентов печатных плат.

Из отечественных паяльных станций рассмотрим семейство «Магистр». Цифровая паяльная станция «Магистр Ц20» (рис. 2.50) при высоких возможностях отличается низкой ценой и компактно-

стью. Блок управления станции 16 раз в секунду измеряет температуру паяльника, и на основе этих данных с учетом динамики изменения температуры цифровой регулятор выбирает текущую мощность нагрева. Это позволяет избегать перегрева мелких контактов и в то же время создавать запас энергии в случае пайки массивных объектов. Станция дает возможность корректировать падение температуры между точкой измерения и кончиком жала (точкой пайки), что очень важно при точной работе с малыми элементами.



Рис. 2.50. Цифровая паяльная станция «Магистр Ц20» [43]

В паяльниках станции нагревателем служит керамический элемент. Станция комплектуется широким ассортиментом жал (паяльных насадок), что в сочетании с простотой крепления жала позволяет подобрать наиболее удобный вариант для пайки конкретного изделия. Жала в основе своей медные с защитным покрытием для предотвращения обгорания.

Для подогрева печатных плат и компонентов предназначены термостолы серии «Магистр Ц20-Т» (рис. 2.51). В термостолах

обеспечивается плоскость рабочей поверхности в пределах 0,2–0,5 мм в зависимости от габаритов столов.

Размеры рабочей поверхности термостолов колеблются в пределах от 100×150 мм (термостол «Магистр Ц20Т-1.0») до 400×450 мм (термостол «Магистр Ц20Т-12.0»).

Диапазон рабочих температур для всей линейки столов составляет 50–350 °С. За счет цифровой системы обеспечивается точность поддержания температуры ± 5 °С.



Рис. 2.51. Термостолы «Магистр Ц20-Т» [43]

Рассмотрим еще одного отечественного производителя оборудования подобного класса. Это НТФ «Техно-Альянс Электроникс» (г. Москва). Номенклатура выпускаемого оборудования включает в том числе паяльные станции и подогреватели плат. В паяльных станциях серии ALPHA-100 (рис. 2.52) заданная температура наконечника обеспечивается за счет динамического терморегулирования.

Электронное управление обеспечивает обратную связь с паяльником, вычисляя скорость отклонения температуры наконечника. Причем теплоемкость паяемого контакта станция определяет, вычисляя скорость отклонения температуры от номинальной. При необходимости реализуется управляющее воздействие — мгновенная передача в паяльник оптимальной дозы энергии.



Рис. 2.52. Паяльная станция ALPHA-100 [26]

Паяльные термостолы серии НП могут быть применены не только для подогрева при ремонтной пайке печатных плат, но и для пайки оплавлением паяльной пасты по термопрофилью, при единичном или мелкосерийном производстве печатных узлов. Причем при реализации пайки оплавлением нужный термопрофиль обеспечивается за счет подключения к компьютеру.

Подводя итог, можно сказать, что паяльные станции верхнего ценового сегмента имеют высокий уровень автоматизации процесса пайки и обеспечивают множество дополнительных функций, но в силу своей дороговизны у них высокий срок окупаемости, вследствие чего они практически недоступны для опытного и мелкосерийного производства и ремонтных предприятий. Паяльные станции нижнего ценового сегмента обладают значительно меньшим функционалом и невысокой автоматизацией, но при этом позволяют выполнять все операции, необходимые для монтажа/демонтажа элементов в BGA и других без выводных корпусах, с соблюдением всех требований технологии. К таким станциям можно отнести семейство «Магистр» производства НТЦ «Магистр» (г. Саратов) и ALPHA-100 НТФ «Техно-Альянс Электроникс» (г. Москва).

Контрольные вопросы

1. Каковы достоинства и недостатки газопламенного нагрева?
2. Каковы достоинства и недостатки при пайке паяльником?
3. Что называют паяльной станцией?
4. Назовите требования к жалу паяльника.
5. Какой горючий газ обеспечивает максимальную температуру газового пламени?
6. Каковы преимущества систем инфракрасной пайки?
7. Какие требования нужно соблюсти при объемном нагреве изделия под пайку?
8. Для чего предназначены термостолы?

3. ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПРИПОЯМИ

3.1. Пайка медных сплавов

К числу особенностей меди и ее сплавов, влияющих на выбор способа пайки, относятся:

- химическая стойкость оксидов;
- содержание во многих сплавах легкоиспаряющихся элементов — цинка, кадмия, марганца;
- склонность кислородсодержащей меди и некоторых ее сплавов к водородной хрупкости;
- повышенная способность меди образовывать интерметаллиды с некоторыми компонентами припоев;
- повышенная способность меди и ее сплавов к хрупкому разрушению в контакте с жидкими припоями;
- повышенная горячеломкость некоторых медных сплавов.

По степени трудности получения паянных соединений медные сплавы можно разделить на две группы: 1) медь и ее сплавы, образующие при нагреве под пайку и в процессе пайки оксиды с невысокой свободной энергией образования и поэтому относительно легко удаляемые при флюсовой пайке; 2) сплавы, на которых при нагреве возникают оксиды с высокой свободной энергией их образования.

К первой группе медных сплавов относятся сама медь и ее сплавы, содержащие в основном следующие элементы: цинк, олово, свинец, фосфор, сурьму, железо, никель, марганец.

Для подготовки поверхности меди и ее сплавов перед пайкой применяют, кроме обычных способов механической очистки и обработки в щелочных растворах, некоторые специфические способы активирования их поверхностей; применение 5-процентного раствора серной кислоты может оказаться достаточным для подготовки к пайке меди. Для очистки поверхности бронз и сплавов на основе Ni – Ag, Ni – Cu и Cu – Cr после обработки в 5-процентном растворе H_2SO_4 их необходимо дополнительно погружать в 2-процентный раствор бихромата натрия с 3 % H_2SO_4 .

Поверхностный слой медных сплавов, содержащих кремний, готовят к пайке при последовательном погружении в 5-процентный раствор H_2SO_4 , затем в смесь 2 % HF и 3 % H_2SO_4 и далее в раствор, применяемый для подготовки бронз, не содержащих элементов с большим сродством к кислороду. Для подготовки поверхностного слоя алюминиевых бронз применяют два раствора: смесь 2 % KF и 3 % H_2SO_4 и смесь 2-процентного раствора бихромата натрия с 5 % H_2SO_4 .

Слои оксидов, образующихся на алюминиевых, бериллиевых, хромистых бронзах, могут быть удалены перед пайкой также в 20–30-процентном растворе серной кислоты в воде [5]. Температура воды – 60–80 °C. Растворение оксидов возможно также в водном растворе азотной кислоты (30 объемных процентов HNO_3). После снятия окалины паяемые детали должны быть промыты для удаления следов кислоты и осушены. Оксиды кремния, бериллия, алюминия перед пайкой удаляют во фтористо-водородной кислоте или в смеси соляной и азотной кислот, после чего поверхность сплава немедленно защищают слоем достаточно активного флюса.

Для низкотемпературной пайки изделий с очищенной от слоя оксидов поверхностью применяют активированные канифольные флюсы, содержащие молочную и другие кислоты [8].

Алюминиевая бронза имеет структуру α -твёрдого раствора алюминия и меди и сложную оксидную пленку, состоящую из трех слоев:

- 1 – Cu_2O ;
- 2 – CuO с частицами Al_2O_3 ;
- 3 – Al_2O_3 ,

С повышением температуры (при нагреве под пайку) в окислительной атмосфере на поверхности медно-алюминиевых сплавов образуется слой пленки Al_2O_3 [15; 16]. Поэтому удаление оксидов при пайке алюминиевых бронз затруднено. Их пайку рекомендуется проводить реактивными флюсами, содержащими соли цинка или кадмия (от 10 до 30 %). Такие флюсы улучшают условия смачивания алюминиевых бронз и увеличивают прочность паяных соединений.

При пайке меди легкоплавкими припоями используют неорганические и органические флюсы.

При пайке меди припоями, богатыми оловом, на границе шва и основного материала по границе шва образуются прослойки химического соединения Cu_5Sn_8 (τ -фаза), в результате чего прочность паяного соединения заметно снижается. Предотвращение такой прослойки возможно в результате весьма кратковременного контакта меди с припоем (1 с), что не всегда достижимо в производстве. Для улучшения механических свойств соединений меди, паяных припоями, богатыми оловом, предложено введение в припой элементов, имеющих более высокую химическую активность по отношению к меди, чем олово, например магния и титана.

Введение в припой ПОС 61 магния в количестве 0,05–0,09 %, а в припой ПОС 40 в количестве 0,05–0,07 % приводит к нарушению непрерывности прослойки τ -фазы по границе шва с медью, что объясняется большим химическим сродством меди с магнием, чем меди с оловом, и измельчением структуры первичных олова и эвтектики в припое и шве.

3.2. Пайка сталей и сплавов

Из легкоплавких припоеv для пайки сталей нашли применение олово и оловянно-свинцовые припой: ПОС 40, ПОС 61. В паяных соединениях, выполненных этими припоями, образуются твердые растворы железа с оловом, а также прослойка химического соединения FeSn_2 .

В качестве флюсов при пайке данными припоями могут быть использованы главным образом флюсы с ортофосфорной кислотой или активированные хлоридами цинка, олова, меди, кадмия. По степени увеличения активности флюсы для пайки углеродистых и низколегированных сталей можно расположить следующим образом: ЛК2, ЛТИ120, водный раствор ZnCl_2 , 38Н, 10, «Прима 2». Наиболее активны при пайке этих сталей флюсы 10 и «Прима 2».

Для улучшения качества паяных соединений из углеродистых и низколегированных сталей соединяемые поверхности деталей иногда предварительно подвергают лужению с применением водного раствора хлористого цинка, затем тщательно смывают остатки флюса.

Облуженные детали больших размеров паяют непрерывно подогреваемыми газовыми паяльниками или кислородно-водородными горелками; в качестве флюса при пайке в пламени горелок следует применять триэтаноламин. Остатки триэтаноламина не вызывают коррозии паяных соединений. Триэтаноламин, в отличие от флюсов ЛТИ120, ЛК2 и т. п., не обугливается в пламени горелок.

Прочность на срез соединений из стали 20, паянных легкоплавкими припоями при использовании флюса $ZnCl_2$, составляет: при пайке оловом – около 32 МПа; ПОС 40 – около 34 МПа. Величина зазора – 0,1 мм.

Прочность стыковых соединений (на разрыв) из стали 20 составляет: при пайке оловом – около 67 МПа; ПОС 40 – около 68 МПа; сплавом Розе – около 21 МПа.

Значительное влияние на временное сопротивление при пайке стали 20 встык оловом и оловянно-свинцовыми припоями оказывает перегрев припоя. При перегреве припоя на 100 °С выше температуры ликвидуса временное сопротивление разрыву стыковых соединений, паянных припоеем ПОС 40, в среднем снижается с 68 до 53 МПа, оловом – с 67 до 44 МПа и сопровождается увеличением пористости шва, что, вероятно, и снижает прочность соединений.

В паяных изделиях могут применяться коррозионно-стойкие стали: ферритные, легированные хромом; аустенитные и аустенитно-ферритные, легированные хромом и никелем; мартенситные и аустенитно-мартенситные, легированные ферритообразующими элементами – алюминием, титаном, молибденом и т. п. На поверхности перечисленных сталей образуются оксиды, химически более стойкие из-за растворенного в них хрома. Поэтому при низкотемпературной пайке таких сталей необходимо применять более активные флюсы. При пайке таких сталей непригодны обычные канифольно-спиртовые флюсы, активированные $ZnCl_2$ и NH_4Cl , а также хлоридные флюсы $ZnCl_2$ и NH_4Cl , их смеси и растворы. В качестве флюса возможно применение раствора ортофосфорной кислоты плотностью 1,6–1,7 г/см³.

Следует помнить, что ортофосфорная кислота вызывает сильную коррозию стали. Для снижения коррозионного действия ее обычно растворяют в смеси спирта (этиленгликоля, этилового)

с защитными составляющими флюсов, в частности с канифолью. Могут применяться следующие составы флюсов: (ЛМ1) 100 мл ортофосфорной кислоты, 300–500 мл винного спирта или этиленгликоля и 20–100 г канифоли; 100 мл ортофосфорной кислоты, 400 мл спирта или этиленгликоля и 30 г канифоли. Данные флюсы слабокоррозионны и применимы при пайке в интервале температур 280–320 °С. При температуре 350 °С и выше флюс улетучивается, а спирт воспламеняется. При нагреве ортофосфорной кислоты до температуры 200–300 °С она превращается в пирофосфорную кислоту $H_4P_2O_7$. В температурном интервале образования пирофосфорной кислоты флюс обладает максимальной активностью.

После пайки с применением флюса ЛМ1, содержащего ортофосфорную кислоту, промывка паяного соединения в щелочи необязательна, достаточно удалить флюс, протерев ветошью. Ввиду возможного улетучивания составляющих флюса нагрев при пайке проводят паяльником или погружением в жидкый припой. При пайке с перегревом в газовом пламени и в печи прочность паяного шва может оказаться пониженной.

Наиболее активен и удобен при пайке коррозионно-стойкой стали припоем ПОС 61 флюс Ф25. В состав флюса входят глицерин, хлористое олово, хлористый кадмий, соляная кислота. Флюс Ф25 обладает реактивным действием, при его контакте со сталью на ее поверхности высаживаются олово и кадмий, которые образуют легкоплавкий подслой, облегчающий растекание припоя. Остатки флюса после пайки необходимо тщательно смывать.

3.3. Пайка алюминиевых сплавов

Алюминий с большинством легкоплавких элементов, составляющих основу легкоплавких припоев (Sn, Pb, Cd, Bi, In, Li, Na), образует монотектические диаграммы состояния с весьма слабой взаимной растворимостью компонентов (кроме цинка, образующего с алюминием эвтектику при температуре 382 °С и широкую область твердых растворов со стороны алюминия и олова). Поэтому низкотемпературная пайка алюминия и его сплавов применяется весьма ограниченно.

Подготовка алюминиевых сплавов перед пайкой состоит из следующих операций: 1 – обезжикивание; 2 – травление в 10–15-процентном растворе NaOH при 60 °C; 3 – промывка в холодной воде; 4 – обработка в 20-процентном растворе HNO₃; 5 – тщательная промывка в проточной горячей и затем холодной воде; 6 – сушка горячим воздухом. Пайка проводится не позже чем через 6–8 ч после подготовки. При низкотемпературной пайке алюминий с чистой блестящей поверхностью можно паять без подготовки.

Обезжикивать поверхности деталей из алюминиевых сплавов перед пайкой можно в органических растворителях – бензине или ацетоне. Такие растворители пригодны для удаления неомываемых щелочами жиров и маркировочных знаков. После сушки на воздухе в течение 10–20 мин процесс обезжикивания считается законченным. После предварительного обезжикивания толстый слой оксида может быть удален механически или химически.

Механическую очистку поверхности алюминиевых деталей и припоя проводят металлической щеткой или шлифовальной шкуркой. Детали, обработанные резанием, можно паять без дополнительной зачистки, но с обязательным удалением остатков эмульсии обезжикиванием. Перед сборкой механически обработанные детали протирают бензином, этиловым спиртом или ацетоном.

Химическую обработку поверхности алюминиевых сплавов перед пайкой проводят в водных растворах едкого натра или едкого натра с кальцинированной содой и тринатрийfosфатом.

Для травления алюминия и его сплавов может быть использован водный раствор 20-процентной фосфорной и 10-процентной азотной кислот со смачивающим агентом. Процесс травления осуществляют при погружении в раствор при температуре 80 °C с выдержкой 1 мин.

Детали из листов, плакированных силумином, могут быть подготовлены к пайке путем промывки их бензином, затем в 5–8-процентном растворе каустической соды NaOH при температуре 60–80 °C, далее в холодной проточной воде инейтрализованы в 10–15-процентном растворе азотной кислоты (40–60 с) с последующей промывкой и сушкой в сушильном шкафу. После сушки на них могут быть водяные потеки, которые не влияют на качество паяного соединения.

Подготавливают поверхности алюминия и его сплавов перед пайкой не позже чем за трое суток.

Подготовленные детали перед флюсовой пайкой собирают с равномерными зазорами шириной 0,15–0,3 мм. Фиксируют детали с учетом размеров и типа конструкции изделия и толщины его стенки путем установки деталей на место под действием собственной массы, точечной сваркой, свинчиванием, кернением, насечкой. Сложные изделия собирают и паяют в специальных прижимных и сборочных приспособлениях с механическими или пневматическими прижимами.

Пайку нагревом до температуры 450 °С проводят обычно оловянно-цинковыми, кадмиево-цинковыми и цинковыми припоями. Соединения из алюминия и его сплавов, паянные легкоплавкими припоями на основе олова или олова со свинцом, имеют низкую коррозионную стойкость как в условиях хранения, так и во всех климатических условиях испытаний и в морской воде.

Склонность к коррозии может быть снижена при введении в легкоплавкие припои цинка. Однако существенного повышения коррозионной стойкости паяных соединений удается достичь лишь при введении в эти припои более 50 % Zn. Вместе с тем подобное содержание цинка в оловянных и оловянно-свинцовых припоях приводит к существенному повышению температуры их полного расплавления, выше 370 °С. При ограничении температуры пайки 300 °С содержание цинка в припоях Sn – Zn не превышает 20 %. При содержании в припоях 30–40 % Zn частичная замена олова кадмием или кадмием и свинцом мало влияет на их температуру начала и конца кристаллизации.

Положительное влияние цинка на коррозионную стойкость соединений из алюминия и его сплавов, паянных оловянными или оловянно-свинцовыми припоями, обусловлено улучшением соотношения потенциалов паяемого металла и шва. Однако при этом важную роль играют процессы пассивирования, т. е. образования оксидной пленки на контактирующих поверхностях металлов, тормозящие развитие коррозии. При развитии пассивирования соотношение потенциалов контактирующих металлов может и не оказывать существенного влияния на развитие коррозии. Развитие процессов

пассивирования тормозится в узких зазорах между контактирующими металлами из-за затрудненного доступа в эти места кислорода, в результате чего в зазорах развивается щелевая коррозия.

3.4. Пайка печатных плат

Наибольшее распространение низкотемпературная пайка получила при пайке печатных плат. Как было сказано выше, все большее распространение получают печатные платы на основе SMT-компонентов. Следует помнить, что SMT-компоненты не могут пропускать через себя большие токи, возможен перегрев из-за маленькой площади теплоотвода. Могут быть иные ограничения в миниатюризации компонентов печатных плат. Например, конденсатор большой емкости невозможно сделать маленьким. Поэтому в ряде случаев на одной плате уживаются традиционные и SMT-компоненты.

В промышленности монтаж и пайка SMT-компонентов производятся с помощью специального оборудования. Основные этапы следующие. С помощью трафаретов на контактные площадки под элементы наносится паяльная паста. Для крупносерийного производства применяются автоматы трафаретной печати (принтеры), а для мелкосерийного используются системы дозирования материала (дозирование паяльной пасты и клея, заливка компаунда и пр.). Автоматические дозаторы нужны для производства изделий, требовательных к условиям эксплуатации.

Затем происходит автоматизированная установка SMT-компонентов на поверхность платы с помощью автоматов установки компонентов (установщиков). В некоторых случаях детали на поверхности фиксируются каплей клея. Станок-установщик оснащен системой забора компонентов (с ленты), системой технического зрения для их распознавания, а также системой установки и позиционирования компонентов на поверхность платы.

Далее плату отправляют в печь, где происходит оплавление паяльной пасты. В зависимости от техпроцесса оплавление может производиться методом конвекции или инфракрасным излучением. Например, для этого могут применяться печи конвекционного оплавления.

Затем следуют операция отмычки печатной платы от остатков флюса и других веществ (масло, жир, пыль, агрессивные вещества), сушка. Для этого процесса используются специальные системы отмычки.

Метод нанесения пасты системами дозирования используется в единичном и мелкосерийном производстве и обладает такими преимуществами, как простота переналадки оборудования и отсутствие необходимости изготавливать дорогостоящий трафарет. Однако по сравнению с трафаретным этот метод не стоит считать более экономичным: стоимость пасты для трафаретного нанесения – около 100 долл./кг, а пасты для дозатора – около 500 долл./кг. В основе диспенсорного метода лежит применение пневматического или механического дозатора (рис. 3.1).

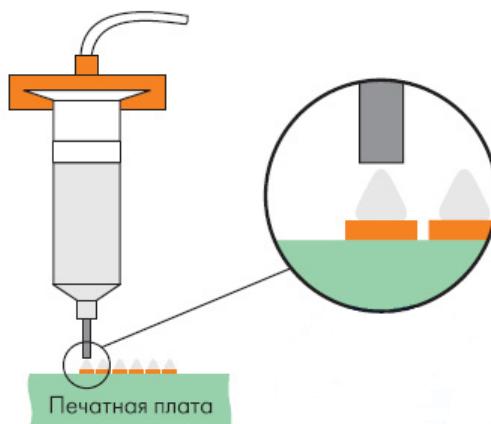


Рис. 3.1. Диспенсорный метод нанесения [38]

Под действием сжатого воздуха или шнека паста выдавливается через иглу на поверхность контактных площадок печатной платы. Метод пригоден как для ручного нанесения, так и для автоматического. Производительность ручной работы для опытных операторов достигает 120 точек/мин, автоматического нанесения – 800 точек/мин. При ручном нанесении пасты возможны два наиболее опасных вида брака: неточное дозирование, которое приводит к замыканиям после оплавления припоя, и разное количество

пасты на контактных площадках одного компонента, что приводит к эффекту опрокидывания. При автоматическом нанесении брак может возникнуть только по вине оператора (за исключением отказа оборудования по техническим причинам), поскольку точность современных установок достаточна (а зачастую и избыточна) для данного процесса. Немаловажным фактором также является качество паяльной пасты.

Принцип трафаретной печати (рис. 3.2) прост: при движении ракеля по поверхности трафарета паяльная паста продавливается сквозь его апертуры на контактные площадки.

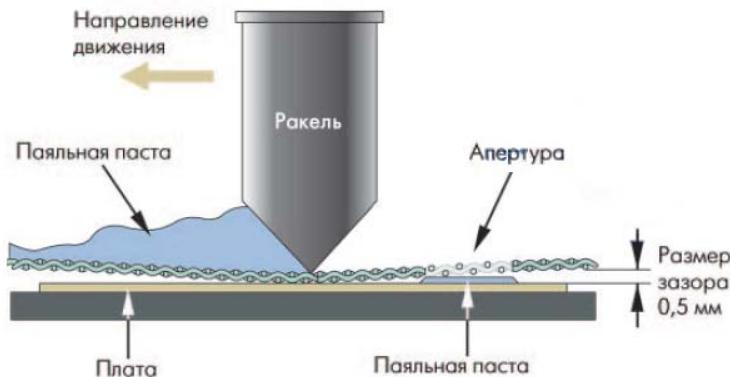


Рис. 3.2. Схема нанесения пасты способом трафаретной печати [38]

Однако при движении пасты вдоль поверхности трафарета ракель должен прижиматься с определенной силой и перемещаться со строго выверенной скоростью. Трафарет и ракель должны быть чистыми, а параметры силы и скорости перемещения ракеля — соответствовать характеристикам пасты. Ошибки в этих параметрах приводят к таким видам брака, как замыкания или непропай. Практика показывает, что свыше половины дефектов при изготовлении печатных плат зарождается в процессе нанесения припойной пасты. Преимущество трафаретного метода в том, что паста может быть нанесена слоем до 300 мкм (в предельных случаях до 650 мкм) с очень высокой точностью. Обычно отверстия трафарета открывают лишь 50–90 % площади контактных площадок, что исключает нанесение

излишнего количества паяльной пасты. В результате данный метод, в отличие от диспенсорного, позволяет осуществлять высокоточный монтаж компонентов со сверхмалым шагом выводов.

При нанесении паяльной пасты трафаретным методом используются специальные установки, которые на рынке паяльного оборудования делятся на два типа: лабораторные ручные рамы и полуавтоматические или автоматические принтеры. В ручных или полуавтоматических установках паяльная паста вручную размещается на трафарете и затем прожигается сквозь него на контактные площадки печатной платы с помощью ракеля (см. рис. 3.2).

Автоматические установки могут работать без вмешательства оператора, причем современные установки (например, фирмы Samsung) имеют встроенные 2D-системы контроля качества, что позволяет проводить контроль сразу после нанесения паяльной пасты, не повышая тактовое время линии. Таким образом, отпадает необходимость дополнительного промежуточного контроля.

Установка поверхностно монтируемых компонентов гораздо проще установки традиционного монтажа в отверстия, а благодаря структуре корпусов компонентов и особенно их выводов стала возможной автоматизация процесса установки.

Для ручной установки поверхностно монтируемых компонентов применяют вакуумные пинцеты. Сегодня рынок оборудования предлагает огромный выбор инструментов и насадок для ручной установки компонентов. Однако небольшие размеры корпусов и малый шаг выводов сильно затрудняют установку компонентов типа QFP и BGA. QFP (Quad Flat Package) – семейство корпусов микросхем, имеющих планарные выводы, расположенные по всем четырем сторонам. Форма основания микросхемы – прямоугольная, а зачастую используется квадрат. Корпуса обычно различаются только числом выводов, шагом, размерами и используемыми материалами. BGA (Ball Grid Array – массив шариков) – тип корпуса поверхностно монтируемых интегральных микросхем. BGA-выводы представляют собой шарики из припоя, нанесенные на контактные площадки с обратной стороны микросхемы. Данный тип корпусов позволяет увеличить плотность (число) компонентов в устройстве и сокращает срок монтажа.

Поэтому вакуумным пинцетом чаще всего устанавливаются пассивные компоненты и интегральные микросхемы с шагом выводов не менее 0,65 мм. Производительность ручной установки составляет порядка 300 комп/ч.

Автоматические системы бывают нескольких видов. Наиболее быстродействующими являются револьверные системы. Однако при высокой скорости установки компонентов низкими являются точность установки и гибкость переналадки. В таких машинах плата обычно неподвижна, а питатели и револьверная головка перемещающиеся. Производительность достигает 60 000 комп/ч. Данный тип оборудования ориентирован на компоненты, поставляемые в ленте, и используется для крупносерийных производств с малой номенклатурой.

Для портальных систем характерно неподвижное расположение плат и питателей и перемещающаяся установочная головка. Производительность достигает 40 000 комп/ч, но при этом точность установки компонентов достигает 20 мкм. В отличие от револьверных систем эти установщики работают с широким диапазоном типоразмеров компонентов. Использование таких систем целесообразно для участков с модульным принципом построения, используемых при создании широкономенклатурных производств, что актуально для России.

В двухпортальных системах традиционно используется концепция сдвоенного блока установки: пока одна головка выполняет позиционирование и установку компонента на печатной плате, вторая осуществляет захват и центрирование компонента из питателя. Программное обеспечение системы управления оптимизирует этот процесс. Некоторые автоматы содержат до 18 установочных головок. Их производительность достигает 100 000 комп/ч, однако такие системы не всегда гибки в переналадке.

В револьверных системах обычно производится контроль и центрирование компонента при каждом повороте головки. Для портальных систем характерно использование видеокамер высокого разрешения при каждой установочной головке, для чего применяются лазерные системы позиционирования или камеры нижнего просмотра. Типичные системы имеют станции центрирования:

установочная головка подводит компонент к системе видеонаблюдения и после центрирования перемещает в зону установки. «Центрирование на лету», например в автоматах фирмы Samsung, существенно повышает производительность и точность установки.

Для работы автоматических систем установки требуются питатели. Питатели могут быть ленточными, пенальными, матричными или кассетными. Наиболее часто используются ленточные питатели. Большинство установщиков используют все возможные типы питателей. Современные сборочно-монтажные автоматы могут быть оснащены интеллектуальными питателями с системой автораспознавания и возможностью подготовки данных для сборки следующего изделия в онлайн-режиме. Таким образом, время переналадки автомата с полной сменой питателей составляет всего несколько минут. Благодаря сетевому подключению оператор получает информацию о компонентах, используемых в настоящий момент, штрихкодах, номере партии; количественных данных, необходимых для планирования производственного процесса.

Компоненты с несимметричным расположением выводов, такие как разъемы, силовые переключатели, колодки и т. д., ранее устанавливались только вручную. Современные автоматы поверхностного монтажа могут устанавливать широкую номенклатуру компонентов с несимметричным расположением выводов, в том числе ряд компонентов, монтируемых в отверстия.

Системам с большим числом установочных головок обычно присущи значительные вибрации. Для предотвращения возможного смещения компонента вследствие вибрации большинство автоматов имеют повышенную массу основания и подвижных элементов системы перемещения. Компания Samsung разработала современные облегченные конструкции автоматов портального типа, работающие на больших скоростях захвата/установки компонентов. Конструкция машин такова, что инерционность подвижных элементов снижается и, соответственно, исключаются вибрационные удары.

Работа рассмотренных автоматических установщиков невозможна без соответствующего программного обеспечения. Важное требование к программному обеспечению управления установщика – простота настройки автоматов и возможность создания

рабочих программ в онлайн-режиме. Отличительная особенность программного обеспечения автоматов компании Samsung – возможность программирования установки и оптимизации программы на следующую партию изделий во время обработки текущей. Это позволяет свести к минимуму время переналадки элементов линии и простоя оборудования.

Около 80 % ошибок на этапе установки компонентов возникает при вводе новых данных в онлайн-режиме. Однако современные установщики могут интегрироваться в сеть, и в случае сбоя проблемные файлы пересылаются в службу технической поддержки. Это исключает необходимость вызова сервисного инженера компании-производителя. Автоматы Samsung имеют встроенную систему самодиагностирования, что позволяет быстро выявить и устранить неисправность.

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

Современные печатные платы содержат наряду с большими корпусами микросборок такие миниатюрные компоненты, как CSP, QFP, µBGA и т. д. Разница между BGA- и CSP-корпусами в том, что у последних размеры компаунда для опрессовывания должны быть в 1,2 раза меньше соответствующих размеров кристалла. На размеры BGA-корпусов никакие ограничения не накладываются. Кроме того, необходимо устанавливать и такие чипы, как 0201, что невозможно без смены инструмента. Обычно в сборочных линиях используют последовательную комбинацию автоматических установщиков: один устанавливает чипы, другой – компоненты с малым шагом выводов. Число тех или иных автоматов в технологической цепочке зависит от требуемой производительности и номенклатуры компонентов.

После установки компонентов выполняется оплавление паяльной пасты. Существуют два основных метода нагрева при оплавле-

нии паяльной пасты: инфракрасным излучением и конвекционный. Системы инфракрасной пайки применяются в мелкосерийном производстве, использующем простые платы и простые компоненты (не рекомендуется паять BGA). Данный метод легко реализуется, однако основной недостаток пайки инфракрасным нагревом в том, что количество энергии излучения, поглощаемой компонентами и платами, зависит от поглащающей способности материалов, из которых они изготовлены. В результате в пределах монтируемого устройства нагрев осуществляется неравномерно. Кроме того, не стоит забывать про теневые эффекты (невозможность пропайки выводов под корпусами микросхем и плат с высокой плотностью монтажа). Большинство современных систем пайки используют конвекционный нагрев. Данный метод легко поддается программированию и контролю, что обеспечивает равномерность прогрева изделия и высокое качество всех типов компонентов. В связи с переходом производства на бессвинцовые технологии актуально использование в качестве рабочей среды инертных газов, в частности азота. Это позволяет исключить окисление узлов пайки при более высоких температурах.

Основное требование к установкам для оплавления паяльной пасты (помимо производительности) – точная выдержка температурного профиля изделия (рис. 3.3).

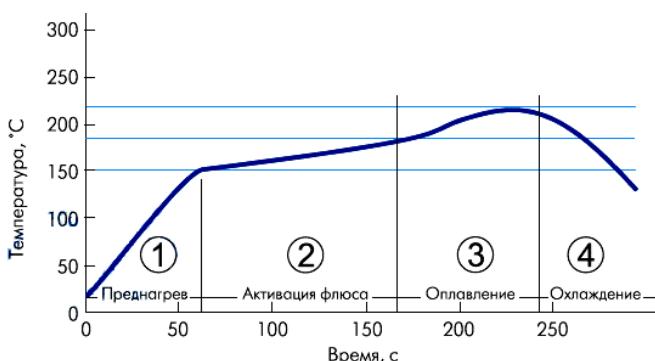


Рис. 3.3. Температурный профиль оплавления паяльной пасты [38]

На стадии 1 выполняется предварительный прогрев платы и установленных на нее компонентов. Предварительный прогрев

позволяет минимизировать коробление изделия и растрескивание компонентов. Следует помнить, что слишком высокая скорость нагрева изделия до температуры активации флюса может также привести к разбрызгиванию припоя (припойный бисер). Рекомендуемая максимальная скорость нагрева не должна превышать 2–4 °C/c.

Главный фактор на стадии 2 – выдержка платы при температуре активации флюса в течение времени, необходимого для активации и полного испарения флюсовой составляющей паяльной пасты. Кроме того, зона теплового насыщения (2) позволяет избежать смещения компонентов относительно контактных площадок платы вследствие разности коэффициента термического расширения корпусов и текстолита.

Время нагрева изделия на первых двух этапах пайки точно рассчитать обычными методами теплотехники практически невозможно из-за большого числа вариантов сборок печатных плат. Однако обобщение экспериментальных данных позволяет говорить о том, что время всего цикла предварительного нагрева колеблется от одной до двух минут независимо от скорости нагрева.

По завершении цикла предварительного нагрева начинается цикл пайки изделия 3 (см. рис. 3.3). При пайке скорость роста температуры до значения расплавления припоя должна быть по возможности высокой, чтобы избежать перегрева компонентов. На практике рост температуры с 120 до 200–220 °C происходит в течение 10–15 с, после чего температура пайки выдерживается в течение времени, необходимого на самоустановку компонентов (10–15 с). После выполнения цикла пайки нагреватели печи выключаются (в камерных печах) либо плата перемещается на конвейере в зону охлаждения (в конвейерных печах).

Далее следует этап охлаждения платы (4), который в зависимости от типа печи и требований по производительности имеет два варианта: естественное охлаждение в печи до отвердения припоя и затем на воздухе или в блоке принудительного охлаждения. В условиях мелкосерийного и единичного производства время охлаждения не учитывается, поскольку оно слишком мало по сравнению со всем циклом пайки и почти не влияет на производительность печи. Обычно время естественного охлаждения припоя до темпе-

ратуры отвердения составляет менее 20 с. Сравнительно быстрое падение температуры в печах подобного класса обусловлено их конструкционными особенностями: стационарная камера нагрева имеет большие тепловые потери благодаря окну загрузки, которое, как правило, остается открытым в течение всего цикла пайки. Кроме того, некоторые типы камерных печей, применяющихся в мелкосерийном производстве, оснащаются механизмом перемещения плат в камеру пайки и на открытое пространство для охлаждения.

Контрольные вопросы

1. Какие флюсы используют при низкотемпературной пайке меди?
2. Назовите особенности пайки меди.
3. Какие применяют варианты нанесения паяльной пасты на поверхность печатных плат?
4. Какие легкоплавкие припои применяют для пайки сталей?
5. Почему низкотемпературная пайка алюминия применяется ограниченно?
6. Почему паяльные платы прогреваются неравномерно при пайке с использованием инфракрасного нагрева?
7. Почему при пайке печатных плат необходим предварительный прогрев паяемого изделия?
8. Какие дефекты могут возникнуть при излишне высокой скорости нагрева при пайке печатной платы?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по пайке / И.Е. Петрунин, Ю.И. Березников, Р.Р. Бунькина [и др.] ; под ред. И.Е. Петрунина. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2003. – 479 с.
2. Петрунин, И.Е. Металловедение пайки / И.Е. Петрунин, И.Ю. Маркова, А.С. Екатова. – Москва : Металлургия, 1976. – 263 с.
3. Краткий справочник паяльщика / И.Е. Петрунин, И.Ю. Маркова, Л.Л. Гржимальский [и др.] ; под общ. ред. И.Е. Петрунина. – Москва : Машиностроение, 1991. – 212 с.
4. Федоров, А.Л. Технология изготовления паяных конструкций : учеб.-метод. пособие / А.Л. Федоров, А.Ю. Краснопевцев, О.В. Шашкин. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2013. – 62 с.
5. Лашко, Н.Ф. Пайка металлов / Н.Ф. Лашко, С.В. Лашко. – Москва : Машиностроение, 1977. – 328 с.
6. Лашко, Н.Ф. Пайка металлов / Н.Ф. Лашко, С.В. Лашко. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1988. – 376 с.
7. Петрунин, И.Е. Пайка металлов : учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов / И.Е. Петрунин, С.Н. Лоцманов, Г.А. Николаев. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Металлургия, 1973. – 281 с.
8. Никитинский, А.М. Пайка алюминия и его сплавов / А.М. Никитинский. – Москва : Машиностроение, 1983. – 190 с.
9. Есенберлин, Р.Е. Пайка и термическая обработка деталей в газовой среде и вакууме / Р.Е. Есенберлин. – Ленинград : Машиностроение, 1972. – 183 с.
10. Манко, Г.Г. Пайка и припои: материалы, конструкции, технология и методы расчета / Г.Г. Манко ; пер. с англ. М.Б. Тапельзона. – Москва : Машиностроение, 1968. – 323 с.
11. Лоцманов, С.Н. Пайка металлов : учеб. для втузов / С.Н. Лоцманов, И.Е. Петрунин. – Москва : Машиностроение, 1966. – 252 с.
12. Родин, А.И. Пайка серебряными припоями в пламени газовой горелки / А.И. Родин. – Москва : Оборонгиз, 1954. – 55 с.
13. Припои и покрытия для бессвинцовой пайки изделий микроэлектроники / В. Зенин, А. Рягузов, В. Бойко [и др.] // Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 5. – С. 46–51.

14. Проектирование технологии пайки металлических изделий : справочник / С.В. Лашко, Н.Ф. Лашко, И.Г. Нагапетян [и др.]. – Москва : Металлургия, 1983. – 280 с.
15. Лашко, Н.Ф. Вопросы теории и технологии пайки / Н.Ф. Лашко, С.В. Лашко. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1974. – 248 с.
16. Хряпин, В.Е. Справочник паяльщика / В.Е. Хряпин. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1981. – 349 с.
17. Припадчев, А.Д. Технология выполнения паяных соединений : учеб. пособие / А.Д. Припадчев, А.А. Горбунов, Н.З. Султанов. – Оренбург : ОГУ, 2015. – 133 с.
18. Григорьев, Б.Л. Пайка металлов и сплавов : учеб. пособие / Б.Л. Григорьев ; под ред. С.А. Ермакова. – 2-е изд., доп. и перераб. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 276 с.
19. Печатные платы : справочник. В 2 кн. Кн. 2 / под ред. К.Ф. Кумбаза ; пер. с англ. под ред. А.М. Медведева. – Москва : Техносфера, 2011. – 1016 с.
20. Хансен, М. Структуры двойных сплавов : [Справочник]. В 2 т. / М. Хансен, К. Андерко ; пер. с англ. П.К. Новика [и др.] ; под ред. И.И. Новикова, И.Л. Рогельберга. – [2-е изд., перераб.]. – Москва : Металлургиздат, 1962. – Т. 1. – 608 с.
21. Серебряник, И.П. Автовакуумная некапиллярная конструкционная пайка : [произв.-практ. издание] / И.П. Серебряник. – Киев : Альфа Реклама, 2011. – 62, [1] с.
22. Фролов, В.П. С.Н. Лоцманов : дорогами открытий / В.П. Фролов, В.П. Плаунов. – Москва : [б. и.], 2009. – 486 с.
23. Тигранян, Р.Э. Хрестоматия радиолюбителя. В 3 т. Т. 1 / Р.Э. Тигранян. – Москва : РадиоСофт, 2008. – 588, [1] с.
24. Хансен, М. Структуры двойных сплавов : [Справочник]. В 2 т. / М. Хансен, К. Андерко ; пер. с англ. П.К. Новика [и др.] ; под ред. И.И. Новикова, И.Л. Рогельберга. – [2-е изд., перераб.]. – Москва : Металлургиздат, 1962. – Т. 2. – С. 609–1488.
25. Захаров, М.В. Диаграммы состояния двойных и тройных систем / М.В. Захаров. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Металлургия, 1990. – 241 с.

26. Горбач, А. Реализация комплексных проектов по переоснащению жгутового производства для изделий специального назначения предприятий ОПК России: от проблемы к ее решению / А. Горбач // Электроника : наука, технология, бизнес. – 2017. – № 6. – С. 170–175.
27. Авторское свидетельство СССР № 1815497, В 23 К 0 14/04. Универсальная инжекторная горелка / М.В. Моргунов, В.В. Быков и Н.В. Бобков. – Опубл. 15.05.93, Бюл. № 18.
28. Авторское свидетельство СССР № 1756049, В 23 К 3/03. Ультразвуковой паяльник / В.М. Колокольцев, В.Г. Шуваев, В.В. Зайцев и П.В. Кузнецов. – Опубл. 23.08.92, Бюл. № 31.
29. Авторское свидетельство СССР № 1590246, В 23 К 3/02. 1/06. Ультразвуковой паяльник / А.И. Молев и В.М. Колокольцев. – Опубл. 07.09.90, Бюл. № 33.
30. Авторское свидетельство СССР № 1574386, В 23 К 1/06. Ультразвуковой паяльник / И.В. Монаенков и С.И. Родионов. – Опубл. 30.06.90, Бюл. № 24.
31. Авторское свидетельство СССР № 653049, В 23 К 3/02. Электрический паяльник / В.В. Рощин, А.М. Филин и В.Ф. Борейко. – Опубл. 25.03.79, Бюл. № 11.
32. Авторское свидетельство СССР № 1794607, В 23 К 3/03. Электропаяльник / Г.Х. Роде. – Опубл. 15.02.93, Бюл. № 6.
33. Переятенец, А. Weller – мир профессионального паяльного оборудования / А. Переятенец // Компоненты и технологии. – 2000. – № 6. – С. 90–92.
34. Колесов, Д. Больше, чем просто паяльник. Ручное паяльное оборудование / Д. Колесов // Компоненты и технологии. – 2002. – № 7. – С. 154–156.
35. Вахрушев, О. SEHO. Печи конвекционной пайки для среднесерийного производства / О. Вахрушев // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – № 3. – С. 25–29.
36. Сизов, А. Конвекционные печи оплавления серии OmniFlex / А. Сизов // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 6. – С. 28–30.

37. Власов, А. Печи для оплавления припоя RO300FC/C / А. Власов // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – № 5. – С. 41–43.
38. Варнавский, С. Поверхностный монтаж: паяльная печь АПИК 1.0 / С. Варнавский, Д. Зенцов // Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 2. – С. 73–74.
39. Сизов, А. Модуль селективной пайки Orissa / А. Сизов // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – № 6. – С. 46–48.
40. Вахрушев, О. Установка для пайки волной в инертной среде от SEHO / О. Вахрушев // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 4. – С. 28–32.
41. Афанасьев, В. IR/PL650 – третье поколение ремонтных центров фирмы ERSA / В. Афанасьев // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – № 4. – С. 80–83.
42. Тренисов, И. Паяльные станции – 100%-ная точность поддержания температуры / И. Тренисов // Электроника : Наука, технология, бизнес. – 2005. – № 8. – С. 60–61.
43. Хавторин, И. Паяльно-ремонтная станция «Магистр Ц20-ИКМ» / И. Хавторин // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 3. – С. 52–53.

ГЛОССАРИЙ

Время выдержки при пайке — интервал времени выдержки паяемых материалов и припоя при температуре пайки.

Время нагрева при пайке — интервал времени нагрева паяемых материалов и припоя в месте их контакта от температуры окружающей среды до температуры пайки.

Время охлаждения при пайке — интервал времени охлаждения паяемых материалов и припоя от температуры пайки до температуры окружающей среды.

Газопламенная пайка — пайка, при которой нагрев паяемых материалов и припоя осуществляется газовой горелкой.

Галтельный участок паяного шва — часть паяного шва, образовавшаяся на наружных поверхностях паяемых элементов.

Длина паяного шва — протяженность паяного шва вдоль перпендикуляра к плоскости характерного сечения.

Затекание припоя в зазор — заполнение расплавленным припоеем паяльного зазора.

Лужение — образование на поверхности материала металлического слоя путем плавления припоя, смачивания припоеем поверхности и последующей его кристаллизации.

Низкотемпературная пайка — пайка при температуре, не превышающей 723 К (450 °C).

Общее время пайки — интервал времени, равный сумме времени нагрева, выдержки и охлаждения при пайке.

Пайка — образование соединения с межатомными связями путем нагрева соединяемых материалов ниже температуры их плавления, их смачивания припоеем, затекания припоя в зазор и последующей его кристаллизации.

Пайка в печи — пайка, при которой нагрев паяемых материалов и припоя осуществляется в печи.

Пайка паяльником — пайка, при которой нагрев паяемых материалов и припоя осуществляется паяльником.

Паяльная паста — пастообразная смесь порошкового припоя с флюсом и связующим веществом или с одним из них.

Паяльный зазор — зазор между поверхностями паяемых заготовок или изделий, образующийся при температуре пайки.

Паяльный флюс — вспомогательный материал, применяемый для удаления окислов с поверхности паяемого материала и припоя и предотвращения их образования.

Паяный шов — часть паяного соединения, закристаллизовавшаяся при пайке.

Припой — материал для пайки и лужения с температурой плавления ниже температуры плавления паяемых материалов.

Растекание припоя — распространение расплавленного припоя на поверхности паяемого материала.

Режим пайки — совокупность параметров и условий, при которых осуществляется пайка.

Температура пайки — температура паяемых материалов и расплавленного припоя в месте их контакта, при которой происходит формирование паяного соединения.

Термический цикл пайки — совокупность значений температуры паяемых материалов и припоя в месте их контакта, при которых происходят нагрев, выдержка и охлаждение при пайке.

Термопара — два проводника из разнородных материалов, соединенных на одном конце и образующих часть устройства, использующего термоэлектрический эффект для измерений температуры.

Толщина паяного шва — расстояние между соединенными пайкой поверхностями по перпендикуляру к ним.

Ширина паяного шва — протяженность паяного шва в характерном сечении паяного соединения.