



БЕЛОРУССКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ГОСПЛАНА БССР

ОБЗОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Серия 47.13.15. Электроника. Радиотехника

В. Л. ЛАНИН, А. А. ХМЫЛЬ

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПАЙКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Минск 1988

УДК 621.791.35: 621.396.6.002.72

Ланин В.Л., Хмыль А.А. Современные процессы пайки в производстве радиоэлектронной аппаратуры. –Мн.: БелНИИНТИ, 1988. –60 с.

В обзоре на основе отечественной и зарубежной научно-технической и патентной информации рассмотрены современные процессы пайки в производстве радиоэлектронной аппаратуры. Проанализированы результаты исследований процессов пайки, интенсифицированных различными методами электрофизических воздействий: ультразвуковыми колебаниями, электромагнитным и лазерным излучениями. Приведены новейшие разработки в области высокопроизводительного оборудования для массовой пайки блоков РЭА волной припоя, пайки перспективных изделий с поверхностным монтажом. Даны рекомендации по практическому применению научно-технических достижений в области пайки изделий радиоэлектронной аппаратуры, использование которых в производстве повысит надежность и качество изделий, уменьшит потери от брака и позволит экономить драгоценные металлы.

Обзор предназначен для научных и инженерно-технических работников радиотехнической, электронной, приборостроительной отраслей промышленности, может быть полезен аспирантам и студентам высших учебных заведений, отвечает направлениям исследований по республиканской научно-технической программе 27.03р.

Табл. 4. Рис. 19. Библиогр. 66.

Рецензенты: д-р техн. наук Л.И.Гурский,
нач. отдела В.В. Дорошкевич

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Способы групповой пайки в производстве радиоэлектронной аппаратуры.....	6
Ультразвуковая пайка и лужение.....	11
Высокочастотная пайка.....	25
Пайка инфракрасным излучением.....	30
Лазерная пайка.....	34
Массовая пайка волной припоя.....	37
Пайка при поверхностном монтаже.....	41
Заключение.....	44
Список использованной литературы.....	46

ВВЕДЕНИЕ

В производстве современной радиоэлектронной аппаратуры /РЭА/ трудоемкость операций сборки и монтажа составляет 50-70% общей трудоемкости изготовления изделий. Микроминиатюризация компонентов и функционально сложных микроэлектронных устройств в значительной степени повышает плотность упаковки элементов в единице объема. Создание сверхбольших интегральных схем /СБИС/ позволило достичь плотности упаковки 10^6 - 10^7 см⁻³, что является физическим пределом в настоящее время. Однако методы монтажа РЭА не обеспечивают такой высокой плотности упаковки в объеме изделия. Если в блоках на печатных платах количество монтажных соединений составляет 10-15 на 1 см², то на миниатюрной плате электронных часов - до 45 и более. В современных многослойных коммутационных платах на керамической подложке минимальная ширина линий и зазоров уменьшена до 0,2-0,4 мм, минимальный диаметр переходных отверстий — до 0,3-0,4 мм, что позволило достичь наибольшей плотности монтажных соединений — 100-150 на 1 см² [1].

Прогрессирующая микроминиатюризация компонентов РЭА вызывает необходимость разработки перспективной технологии монтажных соединений, которая обеспечивала бы создание функциональной микроэлектронной аппаратуры /МЭА/ с высокой надежностью внутрислатных и межблочных соединений. Из современных методов контактирования /сварки, пайки, "холодного" монтажа накруткой и обжимкой/ в технологии производства РЭА наиболее широко применяется пайка. Ей присущи следующие достоинства:

- формирование больших потоков монтажных соединений групповыми методами;
- возможность соединения разнородных по химическому составу и свойствам материалов;
- высокая ремонтпригодность аппаратуры;
- незначительное температурное воздействие на компоненты;
- механизация и автоматизация процесса монтажа.

Используемые в настоящее время на предприятиях традиционные процессы пайки хорошо освоены, однако они характеризуются недостаточно высокой производительностью и не обеспечивают высокого процента выхода годных изделий. Низкий уровень автоматизации, применение ручного труда на отдельных операциях не способствуют высокому качеству соединений. По статистическим данным 50-80% всех отказов в аппаратуре происходит вследствие дефектов паяных соединений, причем стоимость их обнаружения и исправления линейно зависит от этапа изготовления РЭА. Устранение дефектов соединений на этапе сборки обходится в 100 раз дешевле, чем при испытаниях аппаратуры [2].

Прогресс в технологии пайки РЭА достигается сейчас совершенствованием инструментов, оборудования, используемых материалов, а также путем разработки новых, более эффективных технологических процессов. Перспективным является применение современных методов электрофизического воздействия на процесс пайки, включая использование энергии ультразвуковых /УЗ/ и электромагнитных колебаний, инфракрасного /ИК/ и видимого излучений, электронного и ионного лучей [3].

В связи с широким внедрением электронной аппаратуры в промышленность возрастает количество опубликованных работ по проблеме технологии пайки в производстве РЭА. Так, за последние 5 лет количество публикаций по результатам компьютерного поиска увеличилось за рубежом на 40-50%.

Анализ особенностей электрофизических воздействий на процессы пайки имеет решающее значение для рационального использования этих процессов в производстве. На рис.1 представлены статистические данные количества публикаций по исследованиям влияния электрических токов и электромагнитных полей на свойства материалов и их обрабатываемость [4].

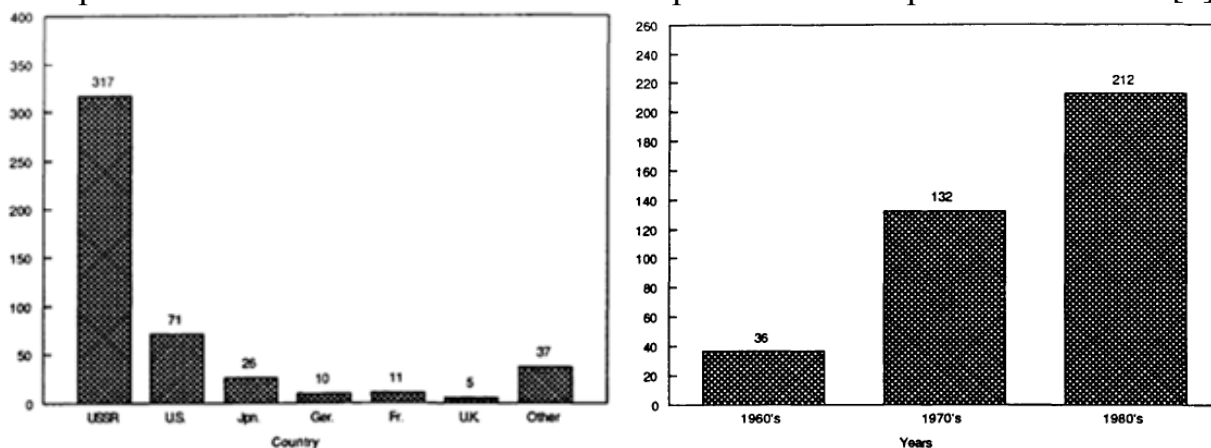


Рис. 1. Количество публикаций по исследованиям влияния электрических токов и полей на материалы по странам (а) и по годам (б)

Наибольший вклад в развитие методов электрофизических воздействий (до 70%) внесен советскими исследователями. На долю США приходилось всего 20% публикаций в этой области.

Современные процессы пайки в технологии РЭА и приборостроении активируются концентрированными потоками энергии ультразвука, высокочастотных электромагнитных полей, инфракрасным и лазерным излучением и др., обеспечивающими локальное и в основном бесконтактное воздействие источника нагрева на паяемые детали, активацию процессов физико-химического взаимодействия, что создаёт новые возможности соединения разнородных по химическому составу и свойствам материалов.

СПОСОБЫ ГРУППОВОЙ ПАЙКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Современные способы групповой пайки в производстве РЭА классифицируются по источникам тепловой энергии, являющимся главным фактором при формировании паяных соединений /рис.2/. В последние годы дальнейшее развитие получили традиционные способы пайки блоков на печатных платах погружением в расплавленный припой или волну припоя.

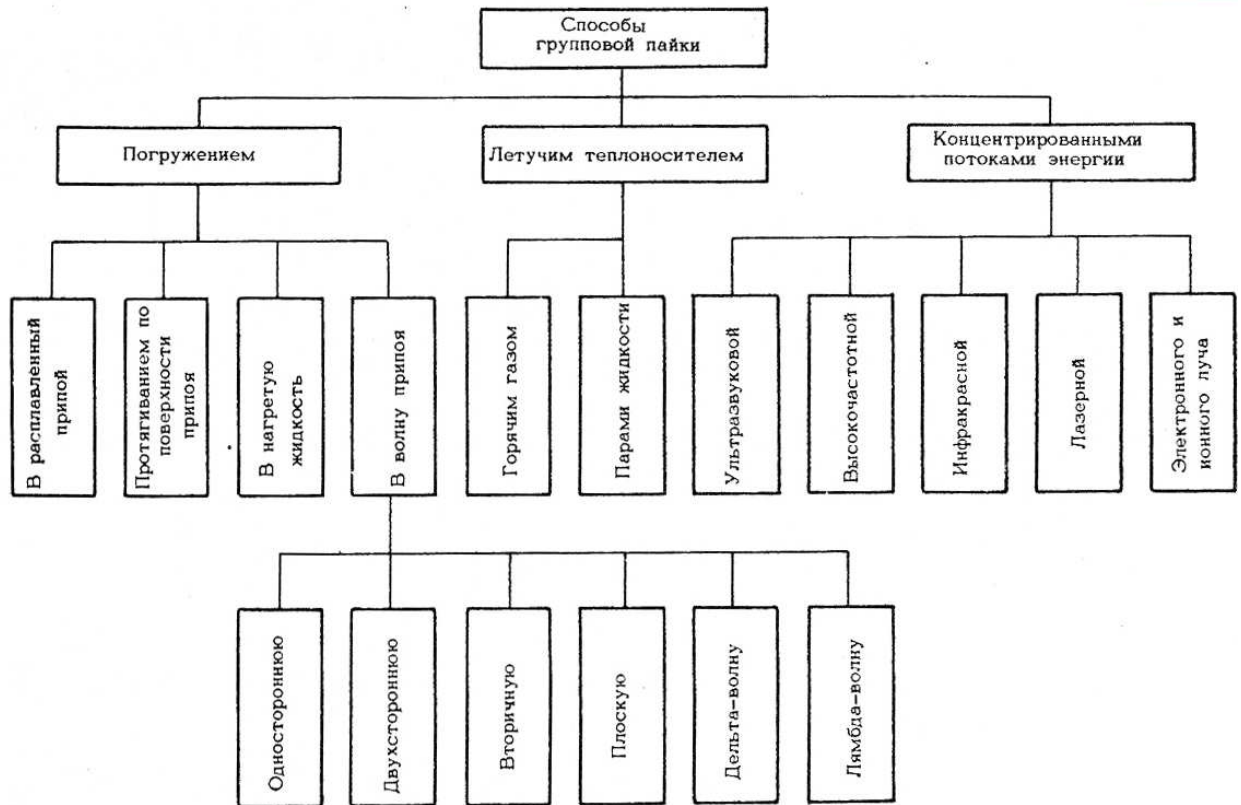


Рис. 2. Классификация современных средств групповой пайки

Совершенствование оборудования для пайки погружением осуществляется путем создания механизированных или автоматизированных линий, имеющих агрегатное строение и выполняющих весь комплекс операций: флюсование, подсушку флюса, предварительный нагрев, пайку, отмывку остатков флюса. Технология групповой пайки совершенствуется путем разработки более эффективных методов контактирования электронных сборок с припоем /протягивание по поверхности припоя; плоская, дельта-, лямбда-волны и т.д./, которые увеличивают производительность процессов пайки, снижают количество дефектных паяных соединений.

Появление новой элементной базы — «чиповых» электронных компонентов, микрокорпусов ИС и СБИС — вызвало необходимость разработки нового метода монтажа на поверхность плат. При поверхностном монтаже компоненты размещаются с обеих сторон платы, панка

осуществляется путем расплавления дозированного припоя на контактных площадках и поверхностях элементов. Для этой цели созданы способы пайки летучим теплоносителем: горячим газом и в паровой фазе жидкости /конденсационная пайка/.

В технологии производства РЭА все более широко применяются способы пайки концентрированными потоками энергии. Достоинствами их являются: локальное и в основном бесконтактное воздействие источника нагрева на зону контактирования; активация не только системы припой — паяемый материал, но и процессов их физико-химического взаимодействия, что интенсифицирует процесс пайки и создает новые возможности соединения разнородных по химическому составу и свойствам материалов.

Активация энергией ультразвуковых колебаний — одно из перспективных направлений в технологии пайки РЭА и приборов. Введение механических упругих колебаний частотой 18-70 кГц и интенсивностью $(1-2)10^5$ Вт/м позволяет резко интенсифицировать большинство физико-химических процессов при пайке: смачивание, растекание, капиллярное течение припоя, диффузию припоя в паяемые материалы за счет увеличения химической активности припоя, паяемых материалов и их физического взаимодействия при пайке [4]. Развитие кавитационного процесса в жидком припое вызывает разрушение окисных пленок, имеющих на поверхности паяемого металла за счет высоких локальных давлений (до 10^6-10^7 Па), возникающих появляются вторичные эффекты, такие как микро- и макропотоки, которые способствуют удалению окисных пленок и ускорению процесса смачивания поверхности металла припоем. Высокие температуры вблизи захлопывающихся кавитационных пузырьков (до 1000К) увеличивают температуру припоя в зоне пайки, химическую активность участвующих в соединении материалов и интенсифицируют процессы физико-химического взаимодействия между ними.

Активация энергией УЗ-колебаний позволяет осуществить бесфлюсовую пайку и лужение большинства металлов и сплавов, применяемых в конструкциях РЭА и приборов. Бесфлюсовая пайка более экономична, поскольку исключаются операции флюсования и очистки, требующие значительных затрат времени и материалов, кроме того, в ряде случаев она является необходимым условием внутреннего монтажа и герметизации микроэлектронной аппаратуры. С помощью ультразвуковой пайки и металлизации удастся соединить трудно-паяемые материалы (никелевые, алюминиевые и магниевые сплавы) и непаяемые (керамика, стекло, ферриты). Это дает возможность значительно экономить драгоценные металлы, наносимые на диэлектрические поверхности электронных компонентов в качестве покрытия. Ультразвуковое технологическое оборудование /генераторы, ванны, паяльники/ серийно выпускается промышленностью и легко подвергается механизации и автоматизации.

Воздействие энергии электромагнитных колебаний средней и высокой частоты (ВЧ) на паяемые детали и припой проявляется в виде

высокопроизводительного бесконтактного нагрева мест контактирования до температуры пайки с помощью наведенных в материале вихревых токов. При этом скорость нагрева может быть увеличена до 10 раз по сравнению со способами пайки- лутчим теплоносителем, область пайки локализуется в пределах 5-10 мм, определяемых конструкцией индуктора. Высокая скорость нагрева токами ВЧ достигается соответствующим выбором частоты тока. Поскольку плотность токов ВЧ по сечению детали распределяется неравномерно, увеличиваясь к поверхности вследствие поверхностного эффекта, то глубина их проникновения δ в металл детали определяется как:

$$\delta = 503 \times \sqrt{\frac{\rho}{\mu \times f}},$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление металла;

μ — магнитная проницаемость металла;

f — частота электромагнитных колебаний;

Нагрев электромагнитными колебаниями средней частоты 60-500 кГц с интенсивностью 10^6 - 10^8 Вт/м², при котором отношение глубины проникновения к толщине детали h будет $\geq 0,5$ - $1,0$, используется для конструкционной пайки деталей РЭА, в частности, волноводных трактов, корпусов металлобумажных конденсаторов, коммутационных элементов и т.д. При пайке микроэлектронных устройств, содержащих металлический корпус и размещенную внутри него подложку или плату с элементами, чувствительными к электрической составляющей поля, энергия электромагнитной наводки должна быть много меньше энергии деградации элементов ИС, которая составляет $(10-15)10^{-6}$ Дж. На глубине, равной 4δ , напряженность поля будет в 100 раз меньше напряженности на поверхности и на порядок ниже напряженности наводок, приводящих к деградации внутренних элементов. Таким образом, выбор частоты при пайке микроэлектронных устройств необходимо осуществлять из условия [5]

$$f \geq \frac{4\rho}{\mu h^2},$$

где h — толщина стенки корпуса устройства

Этому условию удовлетворяет нагрев энергией высокочастотных электромагнитных колебаний в диапазоне 400-1760 кГц. С повышением частоты нагрева происходит локализация тепловыделения, снижается температурное воздействие на паяемое изделие. Дальнейшее повышение локальности и избирательности нагрева токами ВЧ достигается с помощью магнитопроводов из феррита, устанавливаемых вблизи нагреваемых мест.

Воздействие мощного электромагнитного поля на расплавленный припой вызывает его интенсивное перемешивание за счет вихревых токов и давления поля, что улучшает растекание припоя по паяемым поверхностям. В качестве источников высокочастотных электромагнитных колебаний используются ламповые генераторы мощностью 4-10 кВт, серийно выпускаемые промышленностью. Оснащение ВЧ-оборудования реле времени,

транспортным устройством и системой управления на основе микропроцессоров и микро ЭВМ позволяет автоматизировать процесс пайки, что создает предпосылки перехода к безлюдной технологии производства.

Пайка инфракрасным излучением обеспечивает возможность бесконтактного нагрева на воздухе, в контролируемой газовой среде или вакууме. Источником ИК-излучения служат галогенные кварцевые лампы накаливания различного конструктивного исполнения и мощности. Интенсивность спектрального излучения I_λ зависит от температуры T , длины волн источника λ и спектральной степени черноты излучателя ε_λ [6]:

$$I_\lambda = \varepsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/\lambda T} - 1)^{-1},$$

где C_1 и C_2 — постоянные Планка, равные соответственно $0,374 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² и $1,439 \cdot 10^{-2}$ м·К.

Температура нити кварцевых ламп с йодным циклом составляет обычно 2000-3500 К, а диапазон теплового излучения находится в пределах длин волн - 0,76-1000 мкм. Падающее на металлическую поверхность ИК-излучение незначительно проникает вглубь, а в основном отражается от нее. Нормальная отражательная способность гладких поверхностей чистых металлов зависит от их электропроводности и температуры поверхности. В инфракрасной области спектра с увеличением электропроводности отражательная способность металлов возрастает до 98%. Среди чистых металлов полированное серебро, медь, алюминий являются лучшими отражателями и применяются для изготовления рефлекторов в установках ИК-нагрева, которыми осуществляется фокусировка излучения.

Для ИК-нагрева в технологии производства РЭА в большой степени используется узкий диапазон длин волн - от 1 до 5 мкм, который, в свою очередь, делится на коротковолновый, или ближний, - от 1,0 до 1,5 мкм и средневолновый - от 2,5 до 5,0 мкм. Коротковолновый диапазон ИК-излучения позволяет более быстро нагревать объекты, поскольку, согласно закону смещения Вина, максимальная величина спектральной интенсивности излучения с повышением температуры сдвигается в сторону более коротких волн. В качестве источника ИК-излучения для точечных излучателей применяются лампы мощностью 100-650 Вт, для полосовых — 1000-5000 Вт. Так, для линейной лампы КИ-220-1000 при питающем напряжении 220В максимальная интенсивность спектрального излучения достигает 63 Вт/(ср. мкм) на максимальной длине волны 1,1 мкм.

Сфокусированное ИК-излучение дает возможность осуществить локальный нагрев в зоне диаметром 2-3 мм или полосе шириной до 5 мм со скоростью 30-50 град/с. Отсутствие серийно выпускаемых установок ИК-нагрева для пайки вынуждает конструировать и изготавливать их в каждом отдельном случае с учетом конкретных изделий.

Лазерное излучение получило широкое распространение в различных отраслях промышленности. Для процессов пайки оно является удобным,

надежным и экономичным средством бесконтактного нагрева. Преимущества лазерного излучения следующие:

- высокая локализация мощности в зоне нагрева (до 10^{12} Вт/м²);
- безынерционность воздействия излучения, что позволяет вести нагрев импульсами небольшой длительности (10^{-3} - 10^{-2} с) и очень точно дозировать энергию излучения;
- очень малая зона термического влияния (0,03-0,25 мм) при минимальном диаметре пятна нагрева 0,01 мм;
- возможность работы в атмосфере любого состава, соединения материалов с существенными различиями оптических, теплофизических и механических свойств;
- обеспечение расфокусировкой луча необходимого для пайки уровня плотности энергии;
- несложность автоматизации лазерных установок путем применения микропроцессоров и транспортных систем.

Источником лазерного излучения являются оптические квантовые генераторы (ОКГ), которые по агрегатному состоянию рабочего вещества подразделяются на газовые, жидкостные и на твердом теле. В зависимости от способов возбуждения рабочего вещества ОКГ работают с оптической, электрической или химической накачкой в непрерывном или импульсном режиме, а также в режиме синхронизации модуляции.

Оптические квантовые генераторы на неодимовом стекле и рубине имеют высокую удельную мощность — 10^{10} - 10^{12} Вт/м², однако низкую эффективность и ограниченную частоту следования импульсов. ОКГ на иттриево-алюминиевом гранате с длиной волны 1,06 мкм также обеспечивают высокое значение удельной мощности — 10^{10} - 10^{11} Вт/м² в сочетании с высокой частотой следования импульсов (до 20 Гц) вследствие низкого порога накачки и хорошей теплопроводности рабочего вещества. Газовый лазер на CO₂ работает с еще большей эффективностью как в непрерывном, так и в импульсном режиме, однако генерирует длину волны 10,6 мкм, которая хорошо отражается металлами.

Энергия лазерного излучения, падающая на поверхность (E), определяется соотношением [7]

$$E = qS\tau,$$

где q - плотность мощности излучения;

S - площадь облучения;

τ - время действия излучения.

Таким образом, увеличение энергетического вклада в технологический процесс достигается возрастанием q или τ. Проникновение излучения в материал на глубину x описывается уравнением Бугера:

$$E_x = E(1 - R)^{-\alpha x},$$

где R - коэффициент отражения светового излучения поверхностью;

α - коэффициент поглощения света в материале.

Поглощение лазерного излучения происходит в тонком поверхностном слое нагреваемого материала. В связи с этим металлы с высокой электропроводностью (серебро, медь, алюминий) обладают наиболее высоким коэффициентом отражения лазерного излучения. Поглощающая способность поверхности возрастает при нанесении покрытий в виде оксидов, фосфатов, хроматов или при механической обработке до определенной степени шероховатости. Так, увеличение средней высоты микронеровностей поверхности с 0,02 до 0,60 мкм уменьшает коэффициент отражения с 77 до 42%. Лазерное технологическое оборудование для сварки и пайки серийно выпускается промышленностью, легко автоматизируется, управление им осуществляется микропроцессорами и микро ЭВМ.

Использование энергии потоков ускоренных ионов или электронов, фокусируемых в виде луча на поверхность паяемых деталей с помощью электростатических и электромагнитных линз в вакууме, позволяет достичь высоких удельных плотностей мощности нагрева, обеспечить быстроту и локальность нагрева, точно управлять тепловой энергией. В ряде случаев, воздействуя ионным лучом на поверхность детали, можно осуществить очистку от загрязнений и окисной пленки. После совмещения деталей их подвергают повторному облучению, расплавляя припой и соединяя детали после охлаждения. Недостатком такого способа активации является необходимость высокого вакуума, сложного технологического оборудования, что ограничивает производительность и возможности групповой пайки.

Анализ современных способов пайки в производстве РЭА показал, что процессы, активированные концентрированными потоками энергии электромагнитных колебаний высокой частоты, инфракрасного и лазерного излучения, обеспечивают наивысшую производительность, высокое качество паяных соединений. Кроме того, имеются реальные предпосылки их механизации и полной автоматизации. Рациональное использование интенсифицирующих факторов зависит от конструкции паяных соединений, физико-химических свойств паяемых металлов и покрытий, определяется функциональным назначением и конструктивными особенностями блоков радиоэлектронной, электронно-вычислительной или связной аппаратуры

Ультразвуковая пайка и лужение

В промышленности наибольшее распространение получили 3 схемы ультразвукового лужения: в ванне с возбуждением излучателем всей массы припоя, с локальным введением ультразвуковых колебаний в ограниченный объем припоя и ультразвуковым паяльником [4]. Использование ультразвуковых паяльников для металлизации ограничено их низкой

производительностью, трудоемкостью контроля процесса и необходимостью высокой квалификации оператора. Такие паяльники применяются в мелкосерийном производстве для лужения и пайки деталей из алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, а также стекла, керамики и пьезокерамики.

Поверхности деталей, подлежащие лужению, очищают, обезжиривают и нагревают до температуры, которая выше температуры плавления припоя на 10-50 К. На подготовленную поверхность помещают навеску припоя, смачивают в нем наконечник ультразвукового паяльника и производят облуживание плавными круговыми движениями. После окончания операции, не охлаждая детали, с поверхности снимают излишки припоя и остатки шлака. Для лужения используют оловянно-индиевые припои, например ПСрОИН с температурой плавления 403 К [8] или эвтектику системы Sn-Zn (припой П200А) с температурой плавления 473 К [9,10]. Амплитуда колебаний наконечника паяльника 8-15 мкм, частота колебаний 22 или 44 кГц, максимальная мощность 280 Вт. Время образования надежного соединения припоя с поверхностью материала 3-9 с. Зазор между наконечником и обрабатываемой поверхностью 0,15-1,0 мм, угол ввода колебаний 30° [11]. Ультразвуковое лужение силовых многожильных алюминиевых проводов от 10 до 95 мм² осуществляют в ультразвуковых ваннах лужения типа УЗВЛ-0,4, питаемых от генератора УЗГ-5-0,4, или в специально разработанных для этой цели ваннах, например типа УЛАП-7, объемом до 450 см³, питаемых от ультразвуковых генераторов с выходной мощностью 0,4-1,5 кВт и рабочей частотой 20-24 кГц. Время лужения провода от 5 до 25 с [12]. Недостатками такой схемы лужения являются увеличенная мощность УЗ-колебаний, неравномерное распределение интенсивности ультразвука по объему, загрязнение поверхностного слоя припоя шлаками.

Исследовано влияние вида УЗ-колебаний, возбуждаемых в припое с помощью излучателей различной конструкции (продольных, поперечных и крутильных), на уровень кавитационного давления в расплаве в зависимости от частоты колебаний, расстояния от излучающей поверхности волновода и угла его наклона [13]. Ультразвуковое кавитационное давление определялось по спектральной плотности кавитационного шума в полосе частот 100-200 кГц с помощью кавитометра. Усредненное давление в кавитационной области воспринималось измерительным щупом, соединенным с пьезоэлектрическим преобразователем упругим волноводом. Датчик был снабжен нагревателем, поддерживающим на данном уровне температуру воспринимающей поверхности измерительного щупа. Результаты исследований показали, что наибольшее кавитационное давление 2-3 кПа в припое П200А при амплитуде колебаний излучающей поверхности волновода 8-10 мкм наблюдается при расстоянии 0,1-0,2 мм от торца волновода при угле ввода колебаний 0-20° (рис. 3).

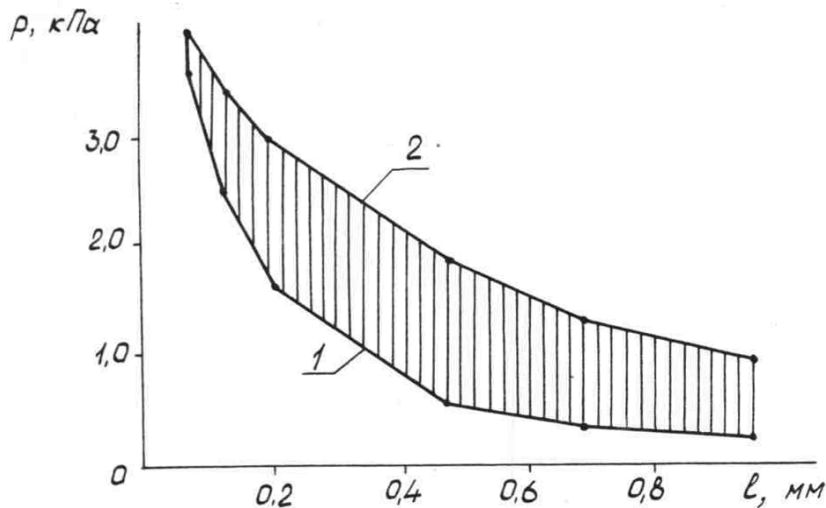


Рис. 3. Зависимость кавитационного давления в припое от величины зазора между торцом излучателя и измерительным щупом

Поэтому при продольных ультразвуковых колебаниях /1/ величина зазора между излучателем и паяемой поверхностью выбирается в пределах 0,20-0,25 мм, при поперечных /2/, параллельных паяемой поверхности, она может быть увеличена до 0,30-0,35 мм при угле ввода колебаний 0-15°. Крутильные колебания в расплавленном припое даже при значительных амплитудах не создают кавитационного давления необходимой величины.

Ультразвуковая металлизация расплавами металлов или припоев неметаллических материалов (керамики, стеклокерамики, пьезокерамики и т.д.) осуществляется, как правило, по схеме тонкого слоя, когда $h \ll \lambda$ [14]. Практически на частоте УЗ-колебаний 22 кГц и при зазоре между инструментом и деталью 0,1-0,5 мм $h/\lambda \sim 10^{-3}$. При этом исключается реализация поля продольной волны, а генерируются волны вязкой природы, волновой вектор которых направлен перпендикулярно боковой поверхности ультразвукового инструмента и параллельно поверхности металлируемого изделия. Волна вязкой природы испытывает быстрое поглощение в направлении внутрь расплава от излучающей поверхности. Коэффициент ее поглощения ($K_{\text{погл}}$) определяется как:

$$K_{\text{погл}} = 1/\delta = \sqrt{\omega/2\nu},$$

где ω - круговая частота;

ν - вязкость расплава,

и на 15-17 порядков превосходит значения, характерные для продольных волн. Это вызывает преобразование большей части энергии волнового движения в энергию акустических потоков, диссипацию энергии и дополнительный нагрев расплава, большие градиенты колебательной скорости и ускорения.

По схеме тонкого слоя успешно металлизуют алюминиевые, титановые

и медные сплавы, некоторые стали, стекло, керамика, полимеры. Для реализации процесса разработаны полуавтоматическая установка, включающая генератор УЗГ-1,6/22, станок для металлизации, пульт управления и контроля. Скорость металлизации составляет $(1,5-2,0)10^{-3}$ м/с.

Процесс ультразвуковой металлизации обычно осуществляется расплавами припоев ПОС61, П200А (10Zn, 90Sn) и чистого олова в диапазоне температур 473-523К. Сплошность металлизации увеличивается от времени воздействия УЗ-колебаний и температуры. Установлены пороговые значения амплитуды колебаний (≤ 15 мкм) и температуры расплава (≤ 493 К), превышение которых ухудшает процесс металлизации.

При ультразвуковой пайке и металлизации важно управлять движением микро- и макропотоков, ориентируя их таким образом, чтобы они обеспечивали массоперенос микрообъемов припоя к паяемой поверхности и ускоряли тем самым протекание реакций химического взаимодействия компонентов- припоя с материалом паяемого изделия. Одновременно необходимо существенно уменьшить скорость микропотоков на границе расплавленной припой - атмосферный воздух, чтобы не допустить повышенного окисления припоя в процессе пайки и, как следствие, ухудшения паяного соединения.

Направление и скорость микро- и макропотоков в вязких жидкостях и расплавах припоев исследовались в зависимости от геометрической формы излучающей поверхности ультразвукового инструмента, амплитуды УЗ-колебаний. Определялось влияние сформированных микро- и макропотоков на прочность спаев, полученных ультразвуковой металлизацией [15]. Ультразвуковые колебания частотой 22 и 44 кГц и амплитудой 10-20 мкм вводились в глицерин с динамической вязкостью 1,48 Па/с и расплав припоя П200А вязкостью 0,7 Па/с с помощью излучателей с различными величиной угла наклона боковой излучающей поверхности к оси излучателя и соотношением сторон излучающих поверхностей. Возникающие микро- и макропотоки в глицерине изучались под микроскопом МБС-2, в расплаве припоя вблизи границы припой - поверхность подогреваемого до 495 К кварцевого сосуда - под микроскопом ММР-2Р.

Скорость микропотоков определялась по движению металлических частиц размером 10 мкм, находящихся во взвешенном состоянии в вязкой жидкости и в расплаве. Микропотоки фотографировались с постоянной выдержкой при освещении импульсами света от лампы-вспышки ИФК-120, питаемой от специального генератора импульсов частотой 10-50 Гц. Зная частоту импульсов вспышки, длительность импульса и измерив на экране проектора длину трека частоты, рассчитывали скорость микропотока в данной области.

Исследования показали, что при величине угла α от 0 до 20° микропотоки в глицерине и расплаве припоя отмечались главным образом у выступов и неровностей излучаемой поверхности инструмента и имели вихревой характер /рис. 4,а/.

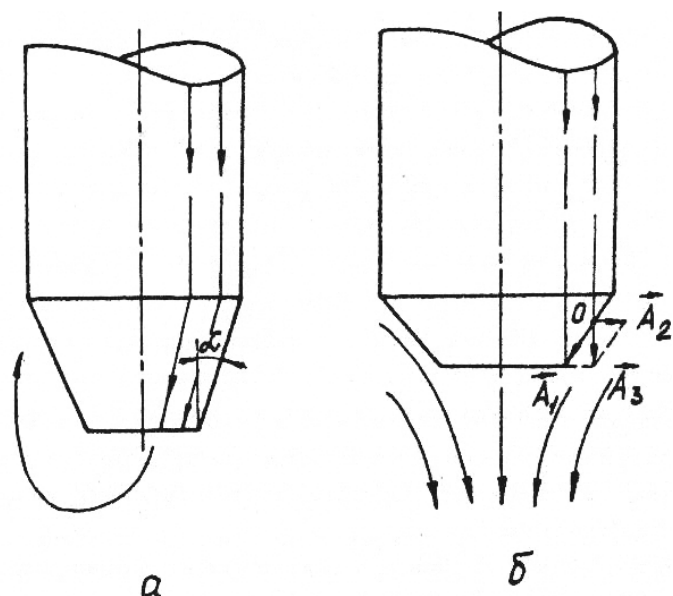


Рис. 4. Образование макропотока в жидкости с помощью излучателей в зависимости от угла α

Скорость их в глицерине составляла 0,02-0,05 м/с, располагались они в плоскости основания корпуса излучающей поверхности инструмента и были удалены от обрабатываемой поверхности. Вследствие разной плотности глицерина в кавитационной и прилегающих к излучателю областях наблюдался медленный макропоток от торцевой излучающей поверхности вверх со скоростью 0,01-0,015 м/с. Микропотоки в кавитационной области вблизи границы раздела припой - кварцевый сосуд также имели вихревой характер, скорость их была 0,02-0,03 м/с. При данной геометрии излучающей поверхности инструмента образующиеся микропотоки имеют локальный характер, в результате массоперенос к обрабатываемой поверхности отсутствует, что не способствует интенсификации процесса ультразвуковой обработки и улучшению качества изделий.

Увеличение угла α от 20 до 45° и уменьшение степени шероховатости излучаемой поверхности от 1,50 до 0,35 мкм вызывают появление в жидкости и расплаве сформированного общего макропотока в направлении от излучаемой поверхности инструмента к обрабатываемой поверхности. В данном случае падающая ультразвуковая волна, частично отражаясь от границы раздела излучающая поверхность - жидкая среда, передается в жидкую среду в направлении вектора смещения \vec{A}_2 /рис. 4.б/. Равнодействующий вектор смещения \vec{A}_3 увлекает частицы и уносит их в направлении к обрабатываемой поверхности. При амплитуде ультразвуковых колебаний 20 мкм скорость макропотока в глицерине на участке от излучателя до поверхности детали составляла 0,02 м/с, а зона его действия простиралась до 10-13 мм. В расплаве припоя ввиду его большей плотности зона действия макропотока не превышала 5-7 мм.

Расчет динамики кавитационных полостей в расплавах припоев по

уравнению Нолтинга-Непайраса с применением метода численного интегрирования на ЭВМ [16] показал, что кавитационные полости с начальным радиусом порядка 10^{-4} м пульсируют с незначительным изменением размера, с 10^{-6} м — захлопываются в конце первого периода колебаний. Кавитационные полости с начальным радиусом 10^{-5} м на частотах 22 и 44 кГц с ростом давления ультразвуковых колебаний увеличиваются и захлопываются при давлении $2 \cdot 10^6$ Па. При меньших значениях давления они пульсируют, не захлопываясь. Повышение частоты УЗ-колебаний до 60 кГц уменьшает резонансный размер полостей ввиду инерционности кавитационного процесса. Результаты расчета максимального радиуса кавитационной полости в зависимости от давления и частоты ультразвуковых колебаний на ЭВМ свидетельствуют о том, что с увеличением давления до $4 \cdot 10^6$ Па наблюдается близкий к линейному рост радиуса полости. Максимальные размеры кавитационных полостей на частоте 22 кГц примерно в 2 раза больше, чем на частоте 44 кГц. Таким образом, при одинаковом соотношении количества зародышей кавитации с различными начальными радиусами увеличение частоты ультразвуковых колебаний приводит к снижению числа захлопывающихся кавитационных полостей и, как следствие, к общему снижению локального кавитационного давления в припое.

Для повышения эрозионной активности УЗ-колебаний в ванну с растворителем вводится кварцевый порошок, который под действием микропотоков в жидкости, соударяясь с поверхностью деталей, удаляет с них окисную пленку. Обработанные таким образом поверхности подвергаются химическому травлению, после чего имеют хорошую паяемость оловянно-свинцовыми припоями [17].

Генерация упругих механических колебаний ультразвуковой частоты в настоящее время осуществляется с помощью магнитострикционных и пьезоэлектрических преобразователей. Большие потери и ограниченные частотные свойства металлических магнитострикционных материалов (никеля и сплавов на его основе) привели к разработке магнитострикционных ферритов, имеющих структуру ферритов-шпинелей и применяющихся в виде поликристаллической керамики. Так как электрическое сопротивление ферритов по сравнению с металлами в 10^8 - 10^{10} раз больше, то потери в них на вихревые токи практически отсутствуют. Ферриты имеют высокие динамические магнитострикционные характеристики и электроакустический КПД в широком диапазоне частот. Однако амплитуда колебаний, генерируемых ферритовыми преобразователями, ограничена их низкой прочностью.

Предложен составной ферритовый преобразователь ультразвуковых колебаний /рис. 5,а/, состоящий из излучателя /1/, ферритового сердечника /2/, обмотки /3/ и постоянного магнита /4/ [18]. В качестве ферритового сердечника использован стержень марки М400НН диаметром 10 мм, длиной $\alpha/2$, где α - длина волны ультразвука, излучатель конической формы

изготовлен из стали 45 длиной, кратной $\lambda/2$. Закрепление преобразователя осуществлялось с помощью фланца, расположенного на расстоянии $\lambda/4$ от плоскости соединения излучателя и сердечника.

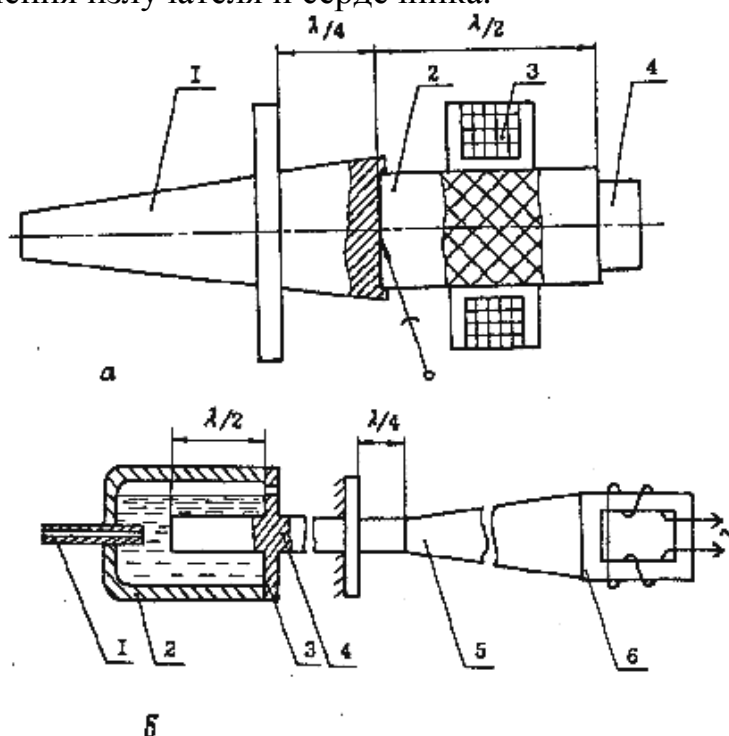


Рис. 5. Ультразвуковые излучатели: а – на магнитоstrictionных ферритах, б – с дозированной подачей припоя

Ферритовый стержень соединен с излучателем посредством припойной прокладки, наносимой с помощью ультразвуковых колебаний. Это позволило обеспечить высокий КПД и механическую прочность составного преобразователя. Малогабаритные ферритовые преобразователи эффективны для локальной обработки металлов и сплавов.

Для дозированной подачи припоя в процессе ультразвуковой пайки или лужения разработан ультразвуковой паяльник [19] (рис.5,б), содержащий преобразователь /6/, трансформатор упругих колебаний /5/ и излучатель /4/, жестко соединенный через фигурный фланец /3/ с камерой /2/ для припоя. Рабочий торец излучателя находится на расстоянии 0,1-1,0 мм от нерабочего торца полого стержня /1/. Упругие колебания ультразвуковой частоты вводятся в припой, вызывая истечение его из полого стержня за счет капиллярного эффекта, и одновременно через камеру и полый стержень передаются паяемым деталям. Дозированная подача припоя увеличивает производительность и стабильность процесса пайки.

Локальное введение УЗ-колебаний в ограниченную зону расплава припоя позволяет значительно повысить интенсивность ультразвука даже при небольшой мощности, потребляемой от источника, уменьшить окисление припоя в ванне, обеспечить возможность полной механизации процесса лужения за счет эффекта перемещения припоя под действием ультразвуковых колебаний. Разработано устройство для УЗ-лужения

алюминиевой проволоки "бесконечной" длины сечением до 2 мм и арматуры из различных металлов толщиной до 1,5 мм /рис. 6,а/. Оно представляет собой конусный волновод-концентратор с коэффициентом усиления 2,5-3,0, соединенный с магнитострикционным преобразователем ПМС-15А-18 [20]. Для лужения концов провода и арматуры в волноводе /3/ выполнили отверстие /1/ в области наибольших смещений, а также выфрезеровали канавку /2/, заполнив ее припоем /4/ при достижении определенной мощности колебаний. В результате образовывалась микрованна, протяжкой через которую на провод наносился слой полуды.

Для лужения и пайки изделий предложена конструкция УЗ-лудилки [21], состоящей из ванны в виде щелевидной емкости, нагревательного элемента и излучателя УЗ-колебаний. Для группового лужения изделий на валике в месте пучности УЗ-волны закреплен диск, позволяющий озвучить определенную зону в ванне с припоем.

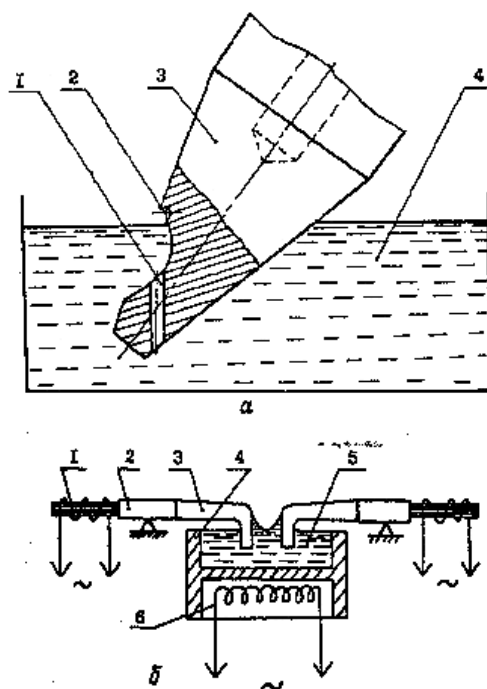


Рис. 6. Устройства ультразвукового лужения: а — проволоки; б — пакетов стеклокерамических конденсаторов

Эффект подъема припоя по излучающей поверхности волновода использован при разработке устройства для УЗ-лужения стеклокерамических конденсаторов без их погружения в расплав припоя. Устройство /рис. 6,б/ [22] содержит 2 ультразвуковые колебательные системы, состоящие из магнитострикционных преобразователей /1/, акустических трансформаторов упругих колебаний /2/, волноводов /3/ рабочие концы которых имеют Г-образную форму и опущены в ванну /4/ с расплавленным припоем /5/. Колебательные системы установлены на основаниях, имеющих возможность точного горизонтального перемещения. Для расплавления припоя и поддержания необходимой температуры пайки использован резистивный

нагреватель /6/. Г-образные концы волноводов колеблются в полуволновом резонансе, что приводит к появлению двух пучностей и узла колебаний. При колебании рабочего конца волновода на припой действует гидродинамическая сила, направленная перпендикулярно рабочей плоскости конца. Под действием ее вертикальной составляющей припой поднимается до уровня верхней пучности, где удерживается за счет адгезии. Таким образом, зона верхней пучности, расположенная выше уровня припоя в ванне, является рабочей, чем и обеспечивается возможность автоматизации процесса лужения.

На Ухтинском заводе "Прогресс" разработана и внедрена в серийное производство полуавтоматическая установка ультразвукового лужения торцов заготовок стеклокерамических конденсаторов с электродами из алюминиевой фольги. Изделия подаются в зону лужения с помощью ротора с зажимами со скоростью 5-100 мм/с. В качестве источников УЗ-колебаний использованы 2 генератора типа УЗГ3-0,4. в акустических системах устройства применены магнитострикционные преобразователи с резонансной частотой (44-1) кГц. Лужение изделий осуществляется припоем П300К (Sn-15%, Zn - 65, Cd - 20%). Оптимальные параметры лужения: температура припоя 703-733К, напряжение на выходе генератора 20-30В, скорость лужения 40-60 мм/с.

Разработан технологический процесс ультразвукового лужения выводов элементов РЭА, имеющих ухудшенную паяемость после длительного срока хранения /свыше 6 мес./ [23]. Схема устройства для УЗ-лужения приведена на рис. 7.

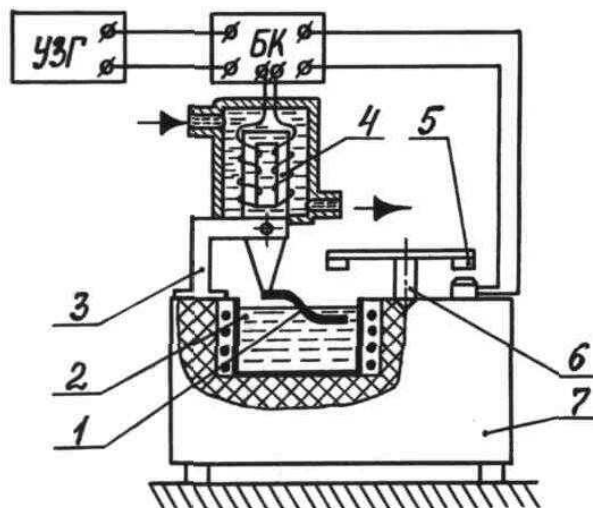


Рис. 7. Схема устройства для ультразвукового лужения выводов элементов РЭА

Преобразователь ультразвуковых колебаний магнитострикционного типа /4/ устанавливается с помощью кронштейна /3/ таким образом, чтобы излучающий элемент /1/, погруженный в расплавленный припой /2/,

находился вблизи его поверхности. Преобразователь имеет герметичный металлический экран, который в процессе работы охлаждается проточной водой давлением до 10^5 Па. С выхода ультразвукового генератора типа УЗГЗ-0,4 электрическое напряжение подается на преобразователь в момент лужения путем дистанционного управления генератором с помощью блока коммутации /БК/ и сенсорного датчика /5/. Автоматическое перемещение деталей и их погружение в припой на заданную глубину в течение 1,5-2,0 с осуществляется поворотным механизмом транспортировки изделий /6/, установленным на ванне с припоем /7/. В расплавленном припое посредством излучающего элемента создается зона интенсивной кавитации, при погружении в нее выводов элементов происходит удаление окисных пленок и смачивание поверхностей припоем. В результате локального введения ультразвуковых колебаний в ограниченный объем припоя резко уменьшается его окисление, увеличивается равномерность интенсивности ультразвука в зоне лужения, снижается потребляемая от источника мощность колебаний, что позволяет уменьшить звуковой шум от работы УЗ-преобразователя.

Контроль качества лужения выводов осуществляется под микроскопом типа МБС-2 с увеличением в 8-16 раз. Оценка паяемости облуженных поверхностей проволочных выводов резисторов, конденсаторов, диодов и других элементов проводилась на установке АП-6048 по величине времени смачивания вывода в капле припоя. Разработанный технологический процесс ультразвукового лужения выводов элементов не требует операций флюсования и очистки от остатков флюса, обеспечивает равномерное лужение поверхностей, элементов, имеющих ухудшенную паяемость после длительного срока хранения.

Ультразвуковая пайка используется при соединении кристаллов и подложек с корпусом в производстве полупроводниковых приборов, интегральных схем и микросборок без применения флюса. Так, использование УЗ-колебаний при пайке кремниевого кристалла к корпусу припоем эвтектического состава Al-Ge (54%Ge) при 723К позволило обеспечить выход годных изделий до 100% и заменить золото в производстве полупроводниковых приборов [24].

Получение надежного омического контакта платы микрополосовых устройств с корпусом при низком тепловом сопротивлении контакта и высокой механической прочности соединения достигается пайкой легкоплавкими припоями. При этом важно обеспечить непрерывный и равномерный по толщине паяный шов, отсутствие остатков флюсов и загрязнений на изделии. Механическое удаление окисных пленок в момент расплавления припоя осуществляется путем сообщения плате низкочастотных колебаний. Перемещение паяемой поверхности платы с амплитудой до 1 мм с помощью вибратора установки ЭМ-415 позволяет разрушить окисные пленки в зоне пайки только при длительном времени притирки /от 30 до 90 с/, требует увеличения габаритов корпуса на двойную величину амплитуды колебаний плат и не обеспечивает полного удаления

остатков окислов из зоны пайки [25].

Разработаны устройство и технологический процесс ультразвуковой бесфлюсовой пайки плат к основанию корпуса /рис. 8/. Корпус /3/ устанавливался между двумя ультразвуковыми системами, расположенными соосно. Для надежной передачи энергии ультразвуковых колебаний волноводы /2/ обеих систем были прижаты к нему с усилием F_1 и F_2 . Напряжение ультразвуковой частоты от генератора УЗГ-0,4 мощностью 400 Вт поступало на обмотки магнестрикционных преобразователей /1/, соединенных последовательно [26].

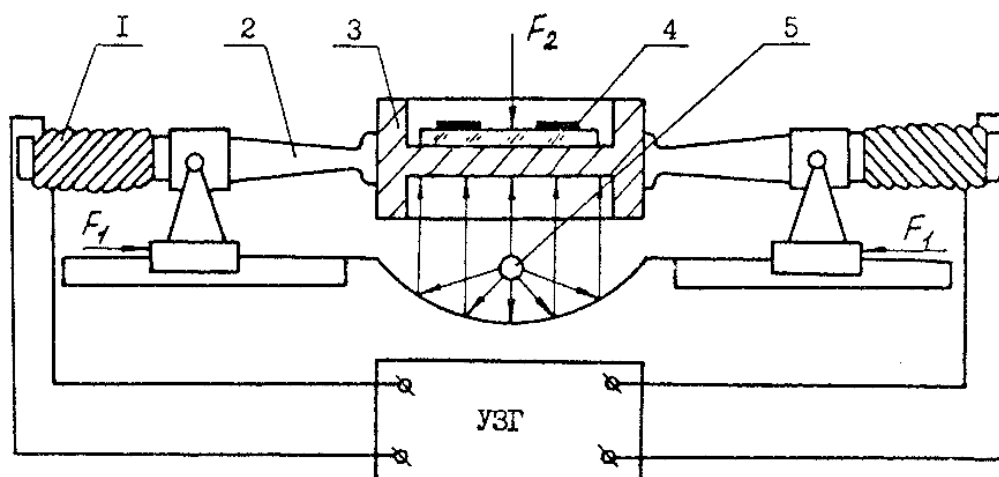


Рис. 8. Устройство ультразвуковой пайки плат к корпусу модуля

Корпус нагревался инфракрасным излучением от двух кварцевых галогенных ламп КИ-220-1000 /5/, закрепленных в диффузных отражателях, охлаждаемых проточной водой (рис. 9).



Рис. 9. Рабочее место УЗ пайки микроплат

Температура пайки стабилизировалась с точностью ± 5 К с помощью электронного блока, управляющего напряжением питания ИК-ламп. В процессе пайки к плате /4/ прикладывалось внешнее статическое давление 1-5 Н, создаваемое подпружиненными штырьками в четырех точках платы. Для обеспечения разрушения окисных пленок и равномерного смачивания всей поверхности платы припоем в изделии создавался режим бегущей волны при постоянной амплитуде и плавно перестраиваемой частоте генератора в пределах 0,5-1,2 кГц.

Исследование степени смачиваемости поликоровых плат, имеющих оловянно-висмутовое покрытие толщиной 6 мкм, показало, что наилучшие результаты /до 96%/ достигались при температуре пайки 493-513К, времени 10-15с, амплитуде колебаний 15-20 мкм и толщине фольги 150-200 мкм. Не установлено отрицательного влияния ультразвуковых колебаний, вводимых в припой, на рабочие параметры микрополосковых плат.

Улучшить качество паяных соединений за счет устранения таких дефектов, как поры, раковины и т.д., и увеличить прочность соединений можно воздействием импульсными ультразвуковыми колебаниями с заданными амплитудой, частотой и длительностью импульса в момент расплавления припоя [27,28]. Контроль состояния припоя и основного материала в процессе нагрева, а также параметров колебаний осуществляется с помощью интерферометра и акустического датчика, сигналы от которых поступают в систему управления устройства пайки.

Интенсивность шумов, генерируемых при работе ультразвуковыми излучателями, измерялась с помощью прибора PRAZ-IMP-PEGELMESSER /ГДР/ в диапазоне частот 315-16000 Гц. Шумы воспринимались микрофонным датчиком на расстоянии 0,5 м от источника звуковых колебаний. Анализ частотной зависимости шумов УЗ-преобразователя работающего на частоте 20,3 кГц при амплитуде колебаний 25 мкм со снятым кожухом и в защитном кожухе, показал, что защитный кожух ослабляет уровень шума на 10-15 дБ. Наибольший уровень шума во всем диапазоне частот не превышал 75 дБ, что ниже допустимого уровня звукового давления 90 дБ, установленного санитарными нормами для частоты 16 кГц.

Волна припоя, сформированная с помощью ультразвукового акустического потока, имеет преимущества волновой и ультразвуковой пайки. Акустический поток, создаваемый высокоамплитудным излучателем, формирует поверхностную волну подобно тому, как образуется струя жидкости электромагнитным нагнетателем (рис.10) [29]. Ультразвуковые волны, распространяясь свободно внутри этой струи, достигают поверхности паяемого изделия, например платы, смывают загрязнения, остатки газов или флюсов, уменьшают поверхностное натяжение припоя, и увеличивают проникновение его в отверстия.

Для удаления окислов с поверхности проволочных выводов компонентов без применения флюса в стоячую волну припоя, возбуждаемую с помощью

крыльчатки и насадки, вводятся УЗ-колебания с помощью волновода и сменного наконечника, погружаемых в волну [30]. Снижение процесса окисления припоя и уменьшение дефектов при волновой пайке с наложением УЗ-колебаний достигается путем изолирования ванны с припоем от окружающего воздуха в контейнере, куда подается подогретый азот.

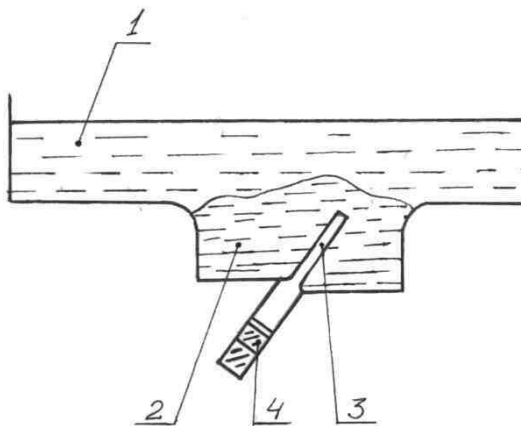


Рис. 10. Образование ультразвуковой волны припоя: 1– защитная жидкость, 2– расплав, 3– излучатель, 4– пьезоэлектрический преобразователь

Источниками питания магнитоstrictionных преобразователей, используемых в процессах пайки и лужения, являются ультразвуковые генераторы / табл. 1/. В качестве маломощного источника наиболее часто используется выпускаемой Московским радиотехническим заводом ламповый генератор УЗГЗ-0,4 [31]. Более мощные генераторы: УЗГ2-4М на тиристорах Московского радиотехнического завода, ламповые УЗГ5-1,6/22 с высокой стабильностью частоты, УЗГ13-1,6 с автоматической подстройкой частоты Таганрогского завода электротермического оборудования - применяются для питания УЗ-ванн или нескольких преобразователей. Перспективными моделями являются выполненные на тиристорах генераторы УЗГ1-1 и УЗГ2-1, имеющие автоматическую стабилизацию амплитуды колебаний магнитоstrictionного преобразователя и отключение силовой части при обрыве или коротком замыкании в нагрузке. КПД тиристорных генераторов достигает 70-80%, масса на единицу мощности 20-25 кг/кВт, коэффициент усиления по мощности 10^5-10^6 . Генератор характеризуется мгновенной готовностью к работе [32].

На основе новой пьезокерамики ЦТС-24М, выпускаемой в виде пьезокерамических колец с наружным диаметром 15-62 мм, во ВНИИТВЧ разработаны пьезокерамические преобразователи с удельной мощностью до 7 Вт/см^2 при естественном охлаждении и до 20 Вт/см^2 при обдуве вентилятором, что приближает их по удельной мощности к магнитоstrictionным преобразователям $/40 \text{ Вт/см}^2/$ [33]. Они подключаются к модульным генераторам мощностью от 63 до 160 Вт, работающим на частотах 22 и 44 кГц.

Таблица 1 — Технические характеристики ультразвуковых генераторов

Параметр	УЗГ3-0,4	УЗГ2-4М	УЗГ5-1,6/22	УЗГ13-1,6	УЗГ2-1
Частота, кГц	17,6-19,3 20,4-23,0 39,6-45,0	17,6-23,5	22±1,65	16,65-23,65	22±1,65
Мощность, кВт выходная потребляемая	0,4 1,10	4,0 3,65	1,6 3,65	1,6 3,20	1,0 1,20
Выходное напряжение, В	20-200	360	220	230	220
Ток подмагничивания, А	2-8	12-30	0-25	0-25	-
Габаритные размеры, мм длина высота ширина	630 387 320	580 720 1350	650 540 1250	500 600 1200	460 460 350
Масса, кг	60	250	235	200	45

Модульный генератор собирается на двух выходных транзисторах типа КТ812, работающих в режиме "класс В" или переключения. В качестве задающего генератора используется частотно-регулируемый мультивибратор на транзисторах или микросхемах. Обратная связь по частоте осуществляется через дифференциальный трансформатор, а связь по мощности - через регулируемый выпрямитель.

Экономический эффект от применения модульных пьезоэлектрических систем складывается из следующих факторов:

- большего в 2 раза КПД преобразователей /60%/ по сравнению с КПД магнитострикционных преобразователей, что уменьшает мощность и габаритные размеры УЗ-генератора;
- исключения из конструкции генератора блока подмагничивания;
- отсутствия водяного охлаждения преобразователя;
- более высокой надежности в эксплуатации.

Внешний вид ультразвукового генератора на транзисторах мощностью до 100 Вт с колебательной системой на составных пьезоэлектрических преобразователях приведен на рис. 11.

Объективный контроль амплитуды колебаний осуществляется виброметрами, а кавитационного давления в припое - кавитометрами, разработанными в Минском радиотехническом институте (рис. 12).



Рис. 11. Ультразвуковой генератор на транзисторах

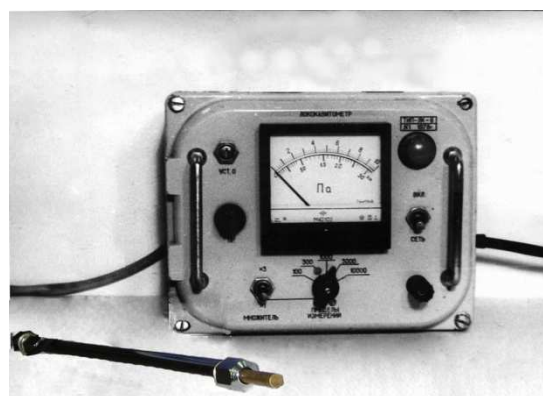


Рис. 12. Внешний вид виброметра (а) и кавитометра (б)

Таким образом, перспективным направлением в технологии монтажа является использование энергии ультразвуковых колебаний для бесфлюсовой пайки при монтаже ИС, БИС и микросборок, а также для лужения труднопаяемых элементов РЭА. Рациональный путь применения ультразвука - его локальное введение в зону пайки при контролируемых параметрах: частоте, амплитуде колебаний, времени воздействия и величине кавитационного давления в припое.

Высокочастотная пайка

Микроминиатюризация РЭА в значительной степени зависит от создания функциональных приборов и блоков в микроэлектронном исполнении, помещенных в общий герметичный корпус. В настоящее время до 40% металлостеклянных и металлокерамических корпусов БИС и микросборок герметизируются пайкой, достоинствами которой являются: ремонтпригодность изделия, невысокие температуры нагрева корпуса, не критичность к плоскопараллельности паяемых кромок, возможность групповой технологии. Традиционные процессы пайки в печи, на плитке или паяльником характеризуются низкой производительностью, значительными затратами ручного труда, не обеспечивают высокого качества паяемых

соединений. Возникают трудности с использованием флюса и необходимостью удаления его остатков.

Перспективным направлением в производстве РЭА является применение высокочастотной пайки для герметизации корпусов БИС и микросборок. Воздействие энергии электромагнитных колебаний позволяет осуществить высокопроизводительный бесконтактный нагрев деталей и припоя с помощью наведенных в них вихревых токов ВЧ, активировать припой и улучшить его растекание по паяемым поверхностям. Качество паяемых соединений в процессах высокочастотной пайки зависит от скорости нагрева деталей и припоя, избирательности и локальности ВЧ-нагрева, равномерности нагрева паяемых деталей, регулируемости нагрева во времени и по сечению паяемых деталей.

Скорость нагрева токами ВЧ пропорциональна мощности (Р), выделяемой в детали:

$$\rho = \frac{(V_{\text{эф}} \cos \varphi)^2}{n^2 (R_{\text{дет}} + R_{\text{инд}})},$$

где $v_{\text{эф}}$ — эффективное напряжение на индукторе;

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности нагрева;

n — число витков индуктора;

$R_{\text{дет}}$ и $R_{\text{инд}}$ — электрическое сопротивление, соответственно детали и индуктора.

Коэффициент мощности прямо пропорционален $\rho \cdot \mu$, где ρ — удельное электрическое сопротивление, а μ — магнитная проницаемость детали. Электрическое сопротивление детали определяется как:

$$R_{\text{дет}} = 2\pi l_{\text{дет}} \frac{\sqrt{\rho \mu f}}{H},$$

где $l_{\text{дет}}$ — периметр зоны нагрева детали;

H — ширина зоны нагрева;

f — частота электрических колебаний.

Таким образом, ВЧ нагрев наиболее эффективен для металлов, имеющих большое удельное сопротивление и магнитную проницаемость (например, никелевые сплавы), и уменьшается обратно пропорционально корню квадратному из частоты колебаний (рис. 13). Снижение частоты колебаний увеличивает электродинамический эффект перемешивания расплавленного припоя. Равномерность нагрева зависит от конструкции индуктора. Так, индуктор, изготовленный пайкой отдельных элементов серебросодержащими припоями с прямыми углами на сгибах, имеет неравномерный температурный профиль, причем температура на участках напротив сгиба почти в 2 раза ниже, чем в центральной части. Лучшие результаты по равномерности нагрева обеспечивают индукторы из цельнотянутой медной трубки с радиусами сгибов, равными диаметру трубки [34].

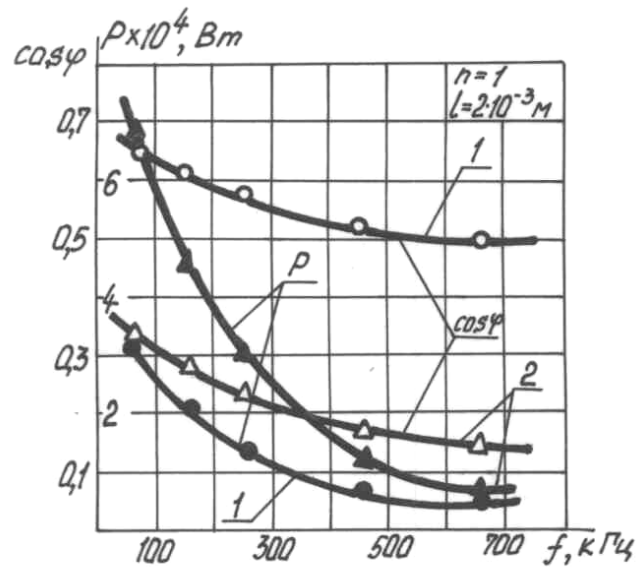


Рис. 13. Частотные зависимости мощности ВЧ нагрева и $\cos \varphi$ для одновиткового индуктора

Разработан технологический процесс герметизации высокочастотной пайкой корпусов БИС и микросборок, изготовленных из ковара (сплав 29Н18К) и имеющих гальванические покрытия никелем и олово-висмутом [35]. Устройство для высокочастотной пайки (рис. 14) состоит из источника ВЧ-энергии - генератора электромагнитных колебаний, специальной оснастки - индуктора, технологического приспособления для фиксации корпуса и контролирующих приборов. Корпус /1/ устанавливается в гнездо основания /2/, на верхней стороне крышки /3/ размещается медный экран /4/, который в процессе пайки прижимается подпружиненным штоком /5/ к корпусу для компенсации повышения давления внутри герметизируемого объема.

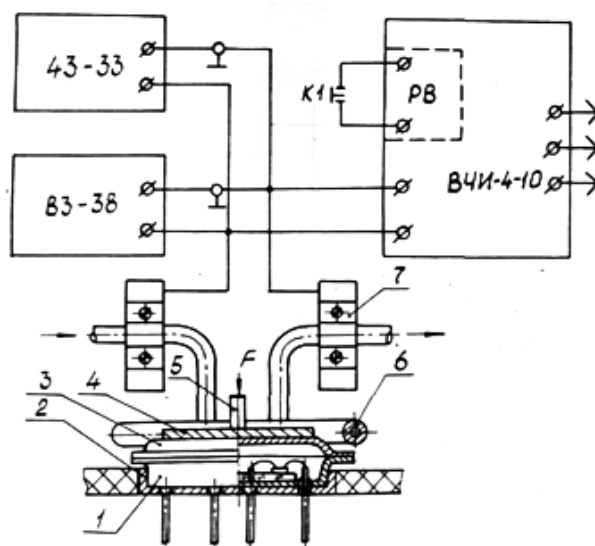


Рис. 14. Схема устройства ВЧ-пайки корпусов БИС

Индуктор токов высокой частоты /6/, изготовленный из отожженной медной трубки с внешним диаметром 3 мм и имеющий гальваническое серебряное покрытие толщиной 25 мкм, охватывает по периферии паяемое изделие. Во время нагрева он охлаждается холодной проточной водой. С выхода генератора ВЧИ-4-10 с помощью токопровода /7/ ВЧ напряжение подается на индуктор, который наводит в паяемом изделии вихревые токи высокой частоты. Дозирование энергии по времени осуществляется с помощью реле РВЧ-2, встроенного в генератор. Величины анодного и сеточного токов контролируются приборами, расположенными на передней стенке шкафа генератора, частота колебаний - электронным частотомером типа ЧЗ-33, напряжение на индукторе - вольтметром типа ВЗ-38.

В технологический процесс герметизации корпусов БИС и микросборок входят: подготовка корпусов и крышек к пайке, сборка корпуса в приспособлении, высокочастотная пайка, контроль качества паяного шва и герметичности корпуса. Подготовка корпусов и крышек к пайке заключается в обезжиривании и горячем лужении паяемых поверхностей припоем ПОС61. После лужения остатки спиртоканифольного флюса удаляются промывкой в спиртобензиновой смеси.

При сборке корпуса в приспособлении крышка прижимается к корпусу с усилием 1,0-3,0 Н, а индуктор размещается на расстоянии 2-3 мм от крышки. Высокочастотная пайка корпусов БИС и микросборок ведется при анодном токе генераторной лампы 1,0-1,3 А, сеточном токе 0,3-0,6 А, что соответствует мощности 5,0-6,5 кВт, на частоте колебаний 450-650 кГц в течение 3-4 с. Паяное соединение корпуса и крышки образуется за счет расплавления и кристаллизации слоя припоя, нанесенного на паяемые поверхности при их лужении.

При герметизации корпусов ИС и БИС ввиду малых геометрических размеров запаиваемых микроблоков применение индукторов с числом витков более двух неэффективно вследствие значительного удаления последующих витков от зоны нагрева. Поэтому при расчете активного сопротивления маловитковых индукторов небольших размеров необходимо учитывать активное сопротивление токопровода индуктора R_{mn} , которым обычно при высокочастотной закалке пренебрегают :

$$R_{mn} = 2\rho_u L_{mn} / \pi D_u \delta_u$$

где ρ_u — удельное сопротивление материала индуктора;

L_{mn} — длина токопровода, т.е. расстояние от рабочей зоны до зажимов генератора;

δ_u — глубина проникновения ТВЧ в материал индуктора.

Высокочастотный нагрев корпусов ИС и БИС, изготовленных из ферромагнитных материалов, например ковара (сплав 29М18К), высокоэффективен, но требует оптимального расположения индуктора

относительно детали.

Оптимизация ВЧ-нагрева при герметизации пайкой корпусов БИС проводилась по скорости нарастания температуры в зоне пайки и температуре нагрева подложки БИС. На металлическом участке подложки закреплялся бусинковый терморезистор СТ1-18, имеющий малое значение постоянной времени и используемый в качестве датчика температуры нагрева подложки. Выводы его припаивались к выводам корпуса БИС и соединялись с электронной схемой измерения температуры. Непосредственно в зоне спаивания, во фланце корпуса, делалась выточка, где располагалась микротермопара типа ХК, соединенная с электронным потенциометром КСП-4 и предназначенная для измерения температуры в паяном шве. После подачи высокочастотного напряжения на индуктор происходил быстрый локальный разогрев паяемых поверхностей до температуры пайки, определяемой по показаниям электронного потенциометра. Время нагрева токами ВЧ регистрировалось секундомером. Запаянные корпуса БИС подвергались испытаниям на герметичность с помощью гелиевого течеискателя ПТИ-7А, а отдельные участки паяного шва - металлографическим исследованиям.

Анализ экспериментальных данных показал, что ВЧ нагрев при использовании двухвиткового индуктора более эффективен, так как увеличивается плотность электромагнитной энергии в зоне нагрева [36]. Однако применение индуктора с витками в одной плоскости предпочтительнее, поскольку сопровождается меньшим нагревом подложки ИС за счет изменения конфигурации электромагнитного поля. В этом случае крышка и корпус БИС нагреваются равномернее, что способствует формированию качественного паяного соединения, и в то же время снижается непроизводительный нагрев защитного экрана. Нагрев подложки удалось уменьшить до 328К путем использования массивного теплоотводящего основания с жидкой прослойкой между ним и корпусом.

Для дальнейшего повышения эффективности нагрева токами ВЧ и снижения теплового воздействия на герметизируемые ИС можно на наружную поверхность крышки наносить известным способом, например гальваническим путем, со стороны индуктора вдоль паяемого соединения покрытие из материала с низким электрическим сопротивлением в форме короткозамкнутого витка. Локальный разогрев сопрягаемых поверхностей корпуса и крышки до температуры пайки происходит за счет преимущественного нагрева наружного покрытия, образующего электрический короткозамкнутый виток с малым электрическим сопротивлением. Время нагрева по указанному способу уменьшается на 30%, нагрев подложки БИС - на 30-40% [37].

Применение ВЧ-пайки для герметизации корпусов многофункциональных модулей имеет следующие особенности: снижение скорости нагрева токами ВЧ вследствие диамагнитных свойств металла корпуса (сплав Д16Т); возрастание потока рассеяния электромагнитной

энергии из-за значительных размеров индуктора, в результате чего уменьшается напряженность поля в рабочей зоне.

Исследование скорости нагрева в зоне пайки корпусов СВЧ-модулей, изготовленных из сплава Д16Т и имеющих крышку из стали 10 толщиной 1,5мм, показало, что применение индуктора с двумя витками, лежащими в одной плоскости, обеспечивает равномерный нагрев корпуса и крышки со скоростью 30-40 град/с. Это способствует полному заполнению припоем зазора между соединяемыми деталями при общем времени нагрева не более 8с. Температура нагрева поликоровой подложки, расположенной на днище корпуса, не превышала 323К. Производительность при пайке в 6-8 раз выше, чем при нагреве на плитке [38].

Скорость нарастания температур в зоне пайки корпуса микросборки при частоте нагрева 400 кГц зависит от мощности ВЧ-нагрева, которая плавно регулируется в генераторе изменением связи между сеточными и анодными контурами, а также от расстояния между индуктором и паяемыми деталями. Уменьшение расстояния до 5 мм и менее характеризуется резким нарастанием температуры в паяемых деталях (рис. 15). "Жесткий" высокочастотный нагрев /1/ вызывает пережог детали, перегрев припоя и, как следствие, появление некачественных паяных соединений. Для снижения скорости нагрева и создания "мягкого" режима пайки /2/ применяют нижнее расположение индуктора под теплостойким основанием из асботекстолита.

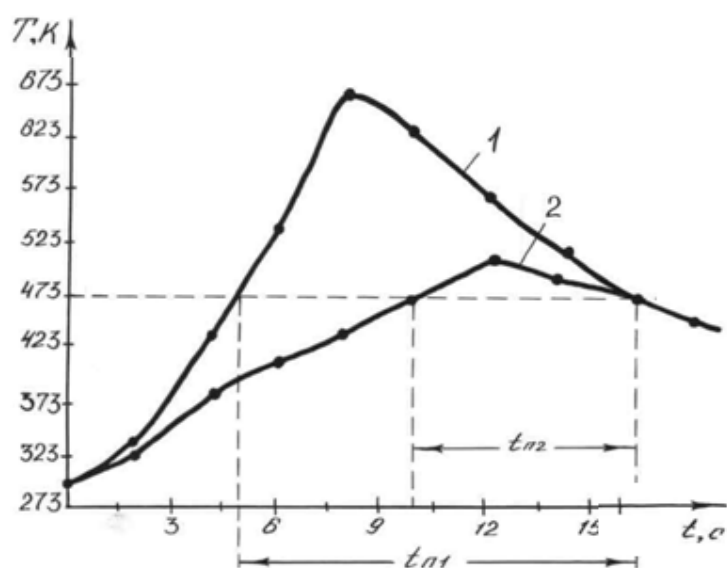


Рис. 15. Температурные зависимости в зоне ВЧ пайки корпусов модулей

Для снижения окисления при ВЧ-пайке в зону нагрева подается защитный газ. В качестве защитной среды используется смесь водорода с азотом в соотношении 1:5, расход которой при пайке составляет 200-300 л/ч [39]. Поштучная высокочастотная пайка деталей, например штифтов к печатной плате, осуществляется с помощью подвижного индуктора, соединенного с вертикальной колонкой [40]. Для повышения качества паяных соединений при ВЧ-пайке используются УЗ-колебания [41].

Источник ультразвуковой частоты выполняется в виде двух соленоидов, между которыми располагается индуктор, а между индуктором и соленоидом устанавливаются экраны, концентрирующие магнитные поля.

Удельную мощность ВЧ-нагрева предварительно можно определить по формуле [42]

$$P_{уд} = 0,3\Delta T/H,$$

где ΔT - перепад температур между горячими и холодными точками изделия;

H - толщина нагреваемого слоя.

Поскольку в процессах пайки оловянно-свинцовыми припоями перепад температур составляет 200-240К, а толщина нагреваемого слоя - не более 0,5 см, то удельная мощность - 120 Вт/см. Вычислив полную площадь зоны нагрева (S) и умножив на коэффициент (K), учитывающий рассеяние теплоты и равный 2,0-2,5, можно найти требуемую мощность ВЧ-нагрева деталей. При более точных расчетах учитываются потери тепла вследствие излучения (P_u), конвекции (P_k), теплопроводности детали (P_t) по номограммам [43], при этом мощность ВЧ-нагрева (P) определяется как

$$P = KP_{уд}S + P_u + P_k + P_t$$

Для ВЧ-пайки применяются ламповые генераторы /табл.2/, оборудованные автоматическими устройствами, отключающими высокое напряжение в случае нарушения режима охлаждения или перегрузки, и снабженные системой подавления помех.

Таблица 2 — Технические характеристики ВЧ генераторов

Параметр	ВЧИ4-10	ВЧГЗ-4/1,76	НГ 0,1-2
Рабочая частота, кГц	400	1760	2000
ВЧ-мощность, кГц	10	4	1,75
Потребляемая мощность, кВт	18,0	6,8	3,4
Расход воды, м ³ /ч	1,20	0,75	—
Площадь, м ²	1,30	0,85	0,60

ВЧ-пайка магнитострикционных ферритовых преобразователей, собираемых из металлизированных цилиндрических дисков в пакет, осуществляется генераторами мощностью 4 кВт, возбуждающими в индукторе высокочастотные импульсы длительностью до 60 с, что обеспечивает дозированный нагрев зоны пайки и равномерное распределение тепла по паяемым деталям [44]. В генераторе НГ 0,1-2 фирмы Himmel /ФРГ/ применены плавное регулирование мощности с помощью управления

напряжением питания сетки лампы в пределах 0-10В тиристорной схемой и принудительное воздушное охлаждение генераторной лампы.

Для герметизации полупроводниковых приборов ВЧ-пайкой разработана установка, состоящая из генератора токов ВЧ, пульта управления и контроля, индуктора, педали включения цикла пайки, стола предварительной сборки приборов перед пайкой. На частоте 13,56 МГц и при мощности нагрева 1 кВт время нагрева составляет не более 1-5 с. Внедрение установки и технологического процесса индукционной пайки приборов взамен ручной позволило улучшить культуру производства, чистоту внутреннего объема и качество приборов, увеличить производительность труда в 4,5 раза, получить годовой экономический эффект 16 тыс. руб. [45].

Применение ВЧ-нагрева для пайки в производстве РЭА имеет хорошие перспективы ввиду возможности гибкой автоматизации процесса путем использования программно-управляемого высокочастотного оборудования, транспортных устройств и управляющих микроЭВМ.

Пайка инфракрасным излучением

Нагрев инфракрасным излучением в целях пайки имеет ряд технологических преимуществ, однако их реализация зависит от. правильно сконструированной установки ПК-нагрева. В настоящее время широкое распространение в технологических процессах пайки получили 2 вида инфракрасного нагрева: локальный сфокусированный и прецизионный рассеянный. Используются различные по геометрии рефлекторы, формирующие тепловое поле в зоне нагрева. Для локального нагрева целесообразны отражатели эллиптической формы, фокусирующие излучение источника света, помещенного в ближнем фокусе рефлектора, на объект нагрева в дальнем фокусе [46]. В зависимости от типа излучателя /1/ рефлекторы /2/ формируют фокальное пятно в виде полосы (для линейных излучателей) /рис. 16,а/ или круга (для точечных излучателей) /рис. 16,б/, причем плотность ИК-излучения, а следовательно, и температура в фокальном пятне снижаются по мере удаления от центра по закону, близкому к закону Гаусса.

В условиях прецизионного нагрева достигается высокая равномерность температуры в результате многократных переотражений излучения ламп и собственного излучения объекта. Для установок периодического или непрерывного (конвейерного) типа используются овально-цилиндрические рефлекторы, которые особенно эффективны для низкотемпературной групповой пайки. С целью ограничения зоны нагрева и снижения температурного влияния на паяемые элементы РЭА применяются сопловые насадки с внутренней отражающей поверхностью /рис. 16,в/ или защитные диафрагмы. Для точечного источника в виде кварцевой галогенной лампы накаливания КГМ-220-1000 и специального профиля рефлектора максимальная облученность в центре зоны нагрева достигает 120 Вт/см.

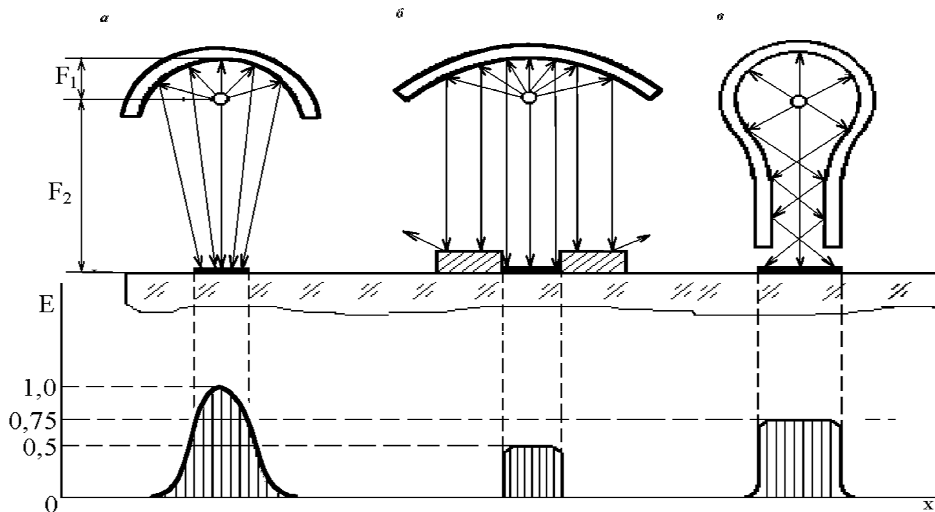


Рис. 16. Способы фокусирования ИК-излучателей:
а – в виде полосы, б - в виде круга, в – с сопловой насадкой

С целью защиты поверхности отражателя и лампы от паров флюса предусмотрено использование съемного кварцевого стекла. Для обеспечения непрерывной длительной работы рефлектор охлаждается водой (расход 0,4 л/мин). Разработанный нагревательный модуль легко встраивается в специальные камеры, а также в автоматизированные установки пайки [47].

Для ксеноновых ламп высокого давления мощностью 4 кВт плотность лучистого потока в фокальном пятне составляет 500 Вт/см^2 . Применяя маску из алюминиевой пластины толщиной 2 мм, в которой согласно расположению паяемых контактов имеются конические отверстия диаметром 2 мм со скосом кромок со стороны действия луча, получают пятна нагрева диаметром до 10 мм. Использование маски с отверстиями позволяет вести групповую пайку планарных выводов ИС к контактными площадкам печатных плат со скоростью до 85 мм/мин.

Разработана полуавтоматическая установка ИК-пайки ленточных кабелей на печатные платы методом вторичного оплавления припоя, наносимого на контактные площадки лужением [48]. Установка состоит из блока ИК-нагрева, содержащего в качестве источника излучения лампу КГМ-900-110, механизма перемещения объекта пайки с помощью координатного стола и блока управления, автоматически поддерживающего температуру в зоне пайки. Позиционирование объекта осуществляется по координатам X и Y размером 230x160 мм с шагом 1,25 мм. Максимальная температура в зоне пайки 1073К, производительность 10000 паяк в час. Применение установки повышает производительность труда в 5 раз и снижает трудоемкость на 12000 нормо-часов по сравнению с ручной пайкой.

Установки ИК-пайки позволяют обеспечить высокую скорость и регулируемость нагрева, создать независимые тепловые зоны для предварительного нагрева элементов и могут найти применение для пайки без выводных элементов на платы.

Лазерная пайка

Лазерное излучение, отличаясь узконаправленным локальным тепловым действием, является надежным и удобным средством бесконтактного нагрева при пайке в технологии РЭА. При этом возможны очень точное управление энергией, строгое позиционирование мест паяк, а также групповая технология формирования соединений. В большинстве технологических применений лазерный луч с помощью оптической системы фокусируется в пятно, диаметр / D / которого определяется как:

$$D = 4\lambda F(\pi D_0),$$

где λ - длина волны излучения;

F - фокусное расстояние оптической системы;

D_0 - диаметр луча в месте его выхода из источника.

Несмотря на высокую когерентность, лазерный луч имеет угловую расходимость (θ):

$$\theta = 4\lambda/\pi D_0.$$

Диаметр светового пятна в фокальной плоскости оптической системы ОКГ составляет 0,25-1,0 мм. Средняя плотность излучения (P_{cp}) оптического квантового генератора

$$P_{cp} = 1/T_n \int_0^{T_n} P(t) dt,$$

где T_n - период повторения импульсов.

Средняя мощность излучения в импульсе

$$P_u = E/\tau_u.$$

Лазерная технологическая установка содержит следующие основные элементы (рис. 17): источник мощности оптического излучения ОКГ (1), оптическую систему формирования лазерного излучения - рабочий канал (2), оптическую систему для наводки излучения и наблюдения за процессом - визуальный канал (3), устройство (4) для закрепления и перемещения обрабатываемого объекта (5), систему управления работой лазера (6), источник питания (7), систему охлаждения и устройство регулирования энергии излучения (8). ОКГ обеспечивает энергетические и временные параметры воздействия лазерного излучения, оптическая система (2) формирует пространственные характеристики пучка как инструмента обработки.

Точность, производительность и удобство обработки в значительной степени определяются характеристиками системы управления лазерной установкой. Характеристики технологических установок, использующих лазер на иттриево-алюминиевом гранате, для пайки и сварки приведены в табл.3.

Лазерное излучение обеспечивает возможность прецизионной пайки "чиповых" конденсаторов, монтируемых поверхностью на платы [49]. Размеры зоны пайки 1,3x0,5мм, время пайки не более 0,6 с.

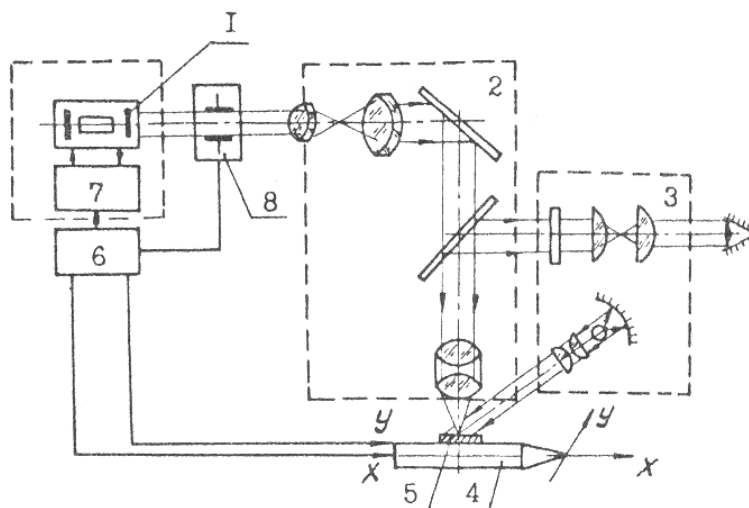


Рис. 17. Схема лазерной технологической установки

Таблица 3. Технические характеристики лазерных технологических установок

Параметр	Квант-9	Квант-10	Квант-12	Квант-16	Квант-17
Энергия излучения, Дж	2	10	3	30	4x2
Длительность импульсов, мс	0,2-0,8	4,0	1,5-4,0	4-7	1,5-4,0
Частота следования импульсов, Гц	1	До 1,0	0,1-20	0,1-1,0	0,1-10
Потребляемая мощность, кВт	2	12	6	12	12
Площадь, м ²					
установки	0,97	0,18	1,17	1,21	0,69
блока питания	—	0,4	0,7	0,5	0,7
Масса, кг					
установки	200	150	250	150	200
блока питания	—	200	350	200	350

Кратковременный нагрев и точное позиционирование лазерного луча ограничивают зону термовлияния при пайке безвыводных элементов на платы. Для пайки используется лазер на основе Nd с излучением в ближайшей ИК-области и длиной волны 1,6 мкм (его энергия адсорбируется сплавами Pb-Sn, Sn-Ni в количестве 79% энергии излучения, а отражается лишь 21%). Лазер на CO₂ с длиной волны 10,6 мкм используется для нагрева диэлектриков, так как материал печатной платы поглощает до 98% энергии

излучения. Лазер мощностью 5-10Вт применяется при оптимальном угле падения луча 45-50°, что обеспечивает равномерный нагрев компонента и контактной площадки и расплавление толстого слоя лужения. Паяные соединения, образованные за короткое время (0,2-0,6 с), почти не имеют хрупкого интерметаллида Cu_2Sn , поэтому выдерживают большие тепловые циклические нагрузки, и характеризуются высокой надежностью [50].

В Исследовательском центре фирмы IBM /Нью-Йорк/ разработана технология сухой (бесфлюсовой) пайки, активированной лазерным излучением в виде импульсов длительностью 12нс с интенсивностью 10 мДж/см² [51]. Нагрев подложек осуществлялся в атмосфере метилбромида CH_3Br при давлении около 10^3 Па. Под действием лазерного излучения инициировался фотолиз газовых молекул, химически активные компоненты которых реагировали с окислами на припое и паяемых деталях с образованием летучих соединений, легко удаляемых из зоны пайки. Подложки нагревались излучением в местах паяк до температуры, превышающей температуру плавления припоя на 30-40К. Такая технология не имеет недостатков флюсовой пайки: разбрызгивания припоя, образования пустот в паяном шве, необходимости очистки деталей от флюсов. Для "сухой" пайки могут быть использованы газовые атмосферы CH_3I , CF_3I , CH_3Cl и др.

Лазерное излучение позволяет локально нагревать крышку полупроводникового прибора при его герметизации, в результате чего перегрев кристалла снижается на 120-150К. Нагрев импульсным излучением с длительностью импульсов до 7 мс и энергией до 30Дж был реализован на установке "Квант-16" в целях герметизации металлокерамических корпусов приборов припоями ПЗл020 и П0Ви-0,5. Время пайки составило 0,01 с, что значительно меньше времени взаимного растворения припоя и материала крышки и времени образования интерметаллидов [7].

Лазерная пайка дает возможность автоматизировать монтаж дискретных элементов РЭА и микросхем на печатных платах. Для этого необходимы автоматическое перемещение платы относительно лазерного излучения с помощью координатного стола и числового программного управления, автоматическая дозировка флюса, припоя и лазерного излучения, а также задание моментов времени их подачи к паяемой системе. С этой целью разработано электронное устройство управления с регулируемыми по времени каналами в интервале 0-10с с дискретностью 10мс [52]. Мощность лазера в непрерывном режиме составляла 60Вт, производительность процесса в среднем 60 паяк в минуту. Для пайки микросхем с планарными выводами к контактными площадкам печатных плат с шагом 1,25мм разработан и серийно выпускается лазерный полуавтомат производительностью 330 паяк в минуту. Он имеет телевизионную систему наблюдения с увеличением в 8 раз, пределом разрешения 0,1 мм.

При пайке световым излучением луч лазера сканирует вдоль паяемых элементов, например контактных площадок. Выводы элементов необходимо

прижимать специальными приспособлениями к контактными площадкам платы для их строгой фиксации и образования однородных соединений [53]. С целью снижения термоудара лазерный луч при выходе из ОКГ раздваивают на 2 луча, которые, проходя по светопроводам, попадают на выводы паяемого элемента. Один из лучей с меньшей интенсивностью используется для предварительного подогрева соединения, с помощью другого луча осуществляется пайка выводов к контактными площадкам [54]. Особенности лазерного излучения позволяют создать программно-управляемое технологическое оборудование, обладающее высокой производительностью и прецизионной точностью.

Массовая пайка волной припоя

Технология и оборудование для массовой пайки блоков РЭА на печатных платах волной припоя в последнее десятилетие непрерывно совершенствовались. Несомненным достижением следует считать появление широких и глубоких волн припоя. Поскольку увеличение ширины волны в направлении движения платы позволяет увеличить производительность процесса пайки, то в новых установках используются так называемые плоские, или широкие, волны протяженностью до 100 мм. Это дало возможность увеличить скорость конвейера в установке Astra фирмы Hollis Engineering /США/ до 3,0-3,5 м/мин (в установках с параболической волной припоя она составляет 0,5-1,2 м/мин) [55].

Глубокие волны — дельта-волна и "отраженная" волна — за счет особой конструкции сопла позволяют удерживать большее количество припоя и вести пайку элементов с длинными выводами, например штыревыми выводами разъемов. Недостатком подобных конструкций является большая их чувствительность к изменению напора нагнетателя припоя. Фирмой Electrovert /Канада/ предложена конструкция лямбда-волны припоя для обеспечения надежной бездефектной пайки блоков на печатных платах с повышенной плотностью монтажа [56]. Форма поверхности лямбда-волны и характеристики потоков в ней выбираются такими, чтобы были обеспечены оптимальные, условия входа в нее, контакта и выхода. Печатная плата входит в волну в точке, где скорость потока максимальная для оптимизации скорости передачи тепла и улучшения смачивания припоем паяемой поверхности плат. Контактная поверхность волны представляет собой гладкую, плоскую, наклонную поверхность. Этим формируется протяженность контакта между припоем и платой, осуществляемого под небольшим углом к горизонту. Выходная часть волны частично стационарна, а частично движется в направлении, противоположном потоку активной части волны. Вследствие этого скорость платы относительно припоя в точке выхода из волны будет нулевой, что исключает образование сосулек на выходах. В установке WSV фирмы Electrovert высота лямбда-волны регулируется от 13 до 19 мм при скорости конвейера до 5,4 м/мин.

На базе лямбда-волны фирмой Electrovert получена вибрирующая волна — омега-волна — за счет размещения вибрирующего элемента в окне сопла, через которое подается припой [57]. Вибрация элемента создается с помощью электромагнитного преобразователя, работающего на частоте 60 Гц с изменяемой амплитудой до 3 мм. Оптимальные параметры пайки: скорость конвейера 1,2 м/мин, температура припоя в ванне 523 К, амплитуда колебаний 1,0-1,3 мм. Исследования показали, что омега-волна сокращает количество дефектов в виде непропаев в 2 раза, обеспечивает заполнение металлизированных отверстий в платах на уровне 99%.

Серийно выпускаемые линии механизированной пайки ЛПМ-300 и ЛПМ-500 по своим техническим показателям уже не удовлетворяют современным требованиям, поэтому на отдельных предприятиях они модернизированы. Так, на базе ЛПМ-300 разработана установка УПМ-300 [58] со следующими новшествами:

- плавным регулированием скорости транспортера от 0,3 до 3,0 м/мин за счет тиристорной схемы управления;
- прекращением пенообразования флюса при выключении двигателя транспортера в результате применения электромагнитного воздухораспределителя, сблокированного с работой транспортера;
- введением для лучшего подогрева печатных плат толщиной более 1,5 мм перед пайкой устройства для автоматической остановки платы на заданную выдержку времени (от 0 до 60 с ступенчато через 5 с) над секцией терморadiационной сушки;
- подачей защитной жидкости, как на волну припоя, так и на его поверхность в ванне.

Характеристики установок волновой пайки приведены в табл. 4.

Разработана новая технология сборки и монтажа блоков на печатных платах, которая включает установку элементов на платы на столах программной сборки без обрезки выводов и подачу собранных плат на линию пайки. Паяемая поверхность платы имеет защитную маску, которая закрывает всю поверхность за исключением участков пайки. На линии SOLTEX /Голландия/ осуществляется двухступенчатая пайка по следующей схеме: пенное флюсование — подогрев — пайка протягиванием по поверхности припоя со скоростью 1,5 м/мин — охлаждение — обрезка выводов фрезой с подзаточкой и пневматическим реверсом — очистка щетками — флюсование — подогрев и пайка волной припоя [59]. При этом сокращается расход припоя, обеспечиваются однородные паяные соединения с заданной высотой выводов над поверхностью платы.

В 80-х годах в массовой пайке волной припоя возникли новые проблемы. Дальнейшая микроминиатюризация компонентов привела к увеличению плотности компоновки, размеры проводников на плате уменьшились до 0,25 мм, а зазоры — до 0,125 мм, число выводов на компонент возросло с 2-3 до 68. Появились безвыводные "чиповые" компоненты, монтируемые поверхностью. Традиционные установки уже не обеспечивают выполнение

основной функциональной цели волновой пайки — оставлять на плате ровно столько припоя, сколько потребуется для образования надежного электрического контакта. Остающийся на плате избыток припоя вызывает образование соединений заливной формы, которые менее надежны, чем соединения видимого контура, способствует возникновению перемычек и сосулек припоя.

Примером нового подхода к технологии массовой пайки волной припоя является концепция "воздушного ножа", предложенного фирмой Hollis Engineering /рис. 18/. Поток горячего воздуха, направленный на плату /1/, удаляет с нее излишки припоя, перемычки и сосульки. Конструктивно сопло /2/ изготавливается из нержавеющей стали и имеет достаточную массу для удержания тепла. Встроенные внутри него нагреватели обеспечивают нагрев воздуха до температуры 648-663К при давлении $3 \cdot 10^5$ Па. Горячий воздух направляется на паяемую сторону платы через 6-8с после выхода ее из волны под углом 40-42° и расстоянии до 20 мм от поверхности платы [60]. Поскольку нагрев воздуха сопровождается значительными затратами электроэнергии, то установки оборудуются автоматической системой, включающей подачу воздуха при выходе платы из волны.

Таблица 4. Технические характеристики установок волновой пайки

Параметр	АП-4	ПАП-300	ЛПМ-300	УПМ-300М	Astra Hollis Engineering
Производительность, ячеек в час	150	240	240	240	300
Максимальный размер паяемых ячеек, мм	380	300	300	300	406
Потребляемая мощность, кВт	5,0	6,2	12,0	13,0	15,0
Масса припоя в ванне, кг	100	180	180	200	291
Время разогрева припоя до 250°С, мин	85-90	60	60	60	60
Диапазон регулирования температур, °С	200-300	150-350	150-350	150-300	150-350
Количество воздуха, подлежащего удалению из зоны пайки, м ³ /ч	1000	1000	1000	1000	1000
Габаритные размеры, мм, длина	894	900	2370	3200	2300

Ширина	630	875	840	610	680
Высота	1374	1360	1415	1500	560
Масса, кг	353	260	500	600	650
Скорость движения транспортера, м/мин	0,5-2,5	0,5-2,5	0,3-3,0	0,3-3,0	0,3-3,5
Пределы регулирования угла наклона транспортера, град	0-25	3-9	4-8	4-8	0-8
Объем защитной жидкости, л	—	7	7	6	7

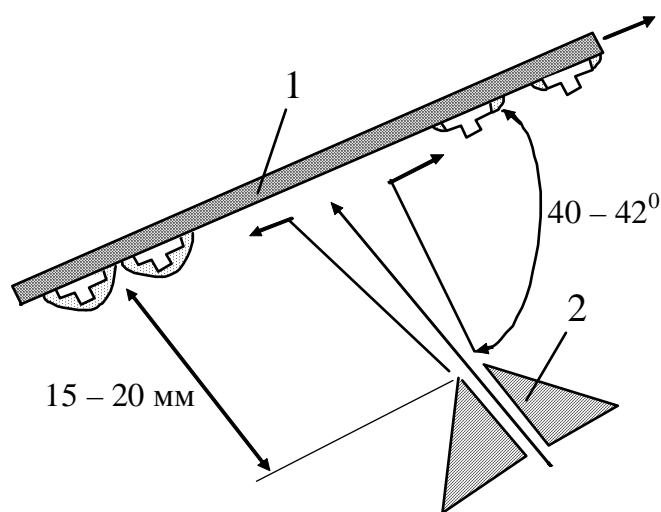


Рис. 18. Подача горячего воздуха на паяемую поверхность платы

Для ограничения количества припоя на печатных проводниках в технологии массовой пайки применяют паяльные маски в виде сухой фотополимерной пленки, наносимой на поверхность платы вакуумным ламинированием и экспонируемой ультрафиолетовым излучением [61]. Пленка обладает хорошей адгезией к поверхности платы и защищает печатный монтаж от климатических воздействий.

До сих пор технология волновой пайки требует высокой квалификации исполнителя, так как многие факторы процесса не контролируются. Сокращение брака и обеспечение высокого выхода годных сборок (до 90% и выше) возможны при компьютеризации процесса. Компьютер не только позволяет улучшить качество сборки, но и увеличить в 10 раз и более скорость контроля [62]. Для реализации компьютерного управления необходимо для каждой электронной сборки сформировать матрицу параметров, таких как тип печатной платы, длина выводов элементов, скорость и ширина конвейера, температура подогрева платы, плотность флюса, температура пайки и др. Компьютеризация позволяет обеспечить стабильность качества паяных соединений в массовом производстве.

Пайка при поверхностном монтаже

Современный этап развития РЭА характеризуется все более широким применением новейшей элементной базы — элементов, монтируемых на поверхность. Безвыводные "чиповые" элементы, а также миниатюрные плоские корпуса БИС позволяют отказаться от плат со сквозными металлизированными отверстиями, упростить установку элементов на платы, повысить надежность электронных блоков. Технология монтажа на поверхность (SMT) получила официальное признание в 1985 г. и имеет следующие преимущества [63]:

- повышение плотности компоновки элементов в 4-6 раз;
- уменьшение габаритных размеров на 60% и снижение массы блоков в 3-5 раз;
- возможность монтажа элементов с двух сторон плат;
- повышение быстродействия и улучшение электрических характеристик элементов за счет отсутствия выводов;
- автоматизацию монтажа элементов и увеличение в десятки раз производительности труда;
- повышение виброустойчивости и вибропрочности блоков в 2 раза;
- большую способность рассеивать тепло;
- сокращение производственных площадей для сборки блоков на 50%.

Предполагают, что к 1990 г. до 70% всех компонентов за рубежом будет монтироваться на поверхность печатных плат. Появление специальных элементов для поверхностного монтажа на печатных платах (мини-резисторов, мини-конденсаторов, миниатюрных корпусов БИС с 44 и 68 выводами и шагом 1,27 мм между выводами) привело к переходу на более узкие (75-200 мкм) дорожки и малые межслойные соединительные отверстия в платах.

Одним из самых важных вопросов является выбор метода пайки элементов на поверхности печатных плат: волной припоя или расплавлением дозированного припоя /Reflow Soldering/. Поскольку в настоящее время в ряде конструкций платы еще содержат компоненты, монтируемые в сквозные металлизированные отверстия (гибридный вид монтажа), то для их пайки используется волна припоя. Однако в этом случае возможны короткие замыкания между элементами; наблюдается эффект блокирования подачи припоя элементами, возникает проблема флюсовых газовых пор. Для решения этих проблем разработаны установки, в которых используются 2 четко разделенные волны припоя, выступающие из двух резервуаров. Первая волна обеспечивает хорошее смачивание паяемых мест и формирование паяных соединений, а вторая, более слабая, удаляет избыток припоя и позволяет избавиться от коротких замыканий. При пайке "чиповых"

элементов на платы рекомендуется [64]:

- выбирать сопло для формирования волны с высоким давлением;
- применять минимальное количество флюса с содержанием смолы не более 10-15%;
- предварительно подогревать плату до 373К;
- следить, чтобы время пайки не превышало 3 с;
- обеспечивать возможность выхода газа из отверстий.

Перспективным методом является пайка компонентов на поверхность печатных плат расплавлением дозированного припоя, который наносится в виде заготовок или паяльной пасты. Во втором случае флюсование не требуется, так как паста имеет в составе флюс. Нагрев платы с пастой производится в 3 этапа: сушка летучей связки, оплавление порошка припоя, растекание припоя по контактной площадке. "Чиповые" элементы, монтируемые на поверхность платы, при установке приклеиваются к ней, при этом ориентируются по отношению к контактным площадкам платы. Используются следующие виды нагрева: контактным электросопротивлением, газом, фокусированным световым лучом, в паровой фазе, а также ИК-нагрев.

Пайка горячим газом применяется для присоединения "чиповых" элементов к многослойным керамическим платам, инертный газ (аргон, азот или их смесь) нагревается, проходя через электронагревательные элементы мощностью 0,8-1,0 кВт под давлением, создаваемым компрессором. Температура его регулируется путем изменения скорости прохождения и напряжения на электронагревательных элементах таким образом, чтобы она превышала на 150К точку плавления припоя. Струя газа вырывается из сопла диаметром 2,5 мм, это позволяет локализовать нагрев паяемых мест. Отсутствие контакта с источником тепла обеспечивает высокое качество паяных соединений.

Наиболее подходящим для поверхностного монтажа оказался метод пайки в паровой фазе (конденсационной пайки), преимущества которого заключаются в быстрой теплоотдаче и равномерном нагреве, постоянной температуре пайки, анаэробной инертной среде, применении слабоактивированных флюсов.

Основной частью установки для пайки в паровой фазе /рис.19/ является резервуар /5/ со слоем рабочей жидкости /1/ на дне. Пар (2) образуется за счет нагрева до кипения с помощью внешних или встроенных нагревателей (6). Для предотвращения его утечки в верхней части резервуара расположены змеевики (3). По мере прохождения смонтированной платы /4/ над кипящей жидкостью пар конденсируется над всей ее поверхностью, быстро и равномерно прогревая до температуры пайки.

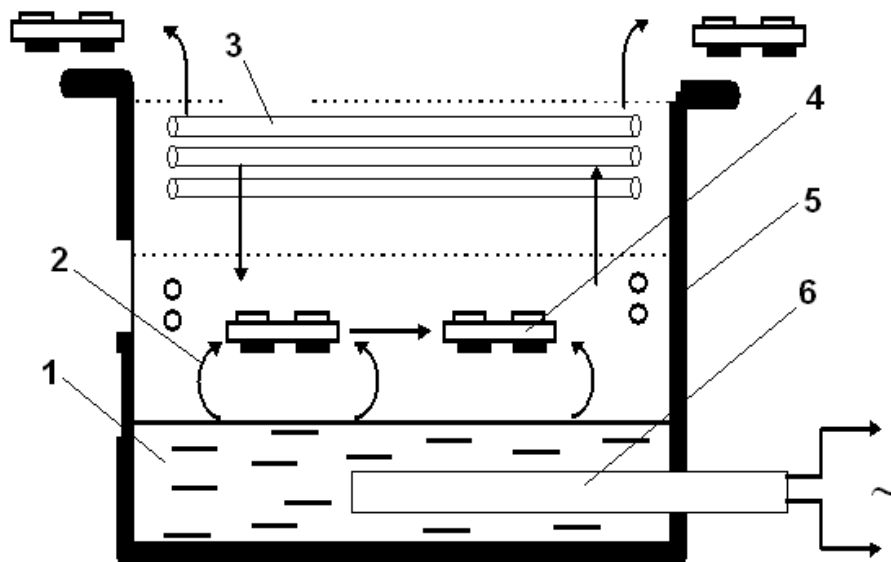


Рис. 19. Схема установки для пайки в паровой фазе

В качестве жидких теплоносителей используются перфорируемые инертные жидкости с температурой кипения несколько выше температуры плавления оловянно-свинцового припоя (например, наиболее распространенный теплоноситель Fluoronert Liquid C-70 имеет температуру кипения 215°C) [65]. Недостатками процесса являются длительность процесса пайки (10-12с), высокая стоимость жидкого теплоносителя, потери рабочей жидкости в атмосферу.

В ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР разработана робототехнологическая линия для сборки плат электронных наручных часов методом поверхностного монтажа [66]. Она построена по линейной схеме и состоит из шагового транспортного устройства с расположенными вдоль него автоматическими манипуляторами, управляемыми по жесткой программе. На первой рабочей позиции на контактные площадки печатных плат наносится припойная паста марки 11227 ТУ ИЭС 417-84 на основе припоя ПОС61 через металлический трафарет с помощью ракеля. Точность нанесения составляет $\pm 0,1$ мм. На последующих рабочих позициях автоматические манипуляторы со специализированными вакуумными схватами монтируют навесные элементы на плату с отпечатками припойной пасты с той же точностью. Оплавление припойной пасты происходит при температуре 483-513К в течение 2,0-2,5с путем подвода пламени водородных микрогорелок к каждой зоне пайки или ИК-нагревом от лампы КГ-1000-220 на полосу 50x25мм. Для эффективной пайки необходима удельная мощность порядка $(20-25)10^4$ Вт/м².

Поверхностный монтаж элементов позволяет применить современное высокопроизводительное оборудование (до 6000 шт/ч), исключить операции подготовки и формовки выводов элементов, сократить производственные площади под участки сборки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение качества монтажных соединений в технологии РЭА связано с разработкой и внедрением высокопроизводительных активированных процессов пайки. Перспективны современные методы электрофизического воздействия на процессы групповой пайки, обеспечивающее высокую управляемость параметров, программируемое технологических процессов и оборудования, высокое качество паяных соединений. Реальные возможности полной автоматизации имеют процессы пайки, активированные концентрированными потоками энергии электромагнитных колебаний высокой частоты, инфракрасного и лазерного излучений.

Ультразвуковая активация рациональна для процессов пайки и лужения неметаллических, труднопаяемых металлических материалов, позволяет интенсифицировать смачивание припоем при отсутствии флюса, заменить драгоценные металлы (платину, палладий, серебро) более дешевыми припоями. Применение технологического процесса ультразвуковой бесфлюсовой пайки подложек ГИС в корпуса модулей на одном из предприятий дало возможность увеличить смачиваемость припоем с 60 до 90% и получить экономический эффект 52 тыс.руб.

Использование энергии высокочастотных электромагнитных колебаний ускоряет нагрев деталей под пайку до 10 раз, оказывает минимальное тепловое воздействие на паяемые изделия за счет локализации нагрева, а применение полуавтоматических установок способствует росту производительности труда. Технологический процесс ВЧ-пайки микросборок обеспечивает высокое качество паяных соединений, культуру производства и автоматизацию труда. Внедрение технологии высокочастотной пайки на одном из предприятий дало экономический эффект 50 тыс.руб.

Процессы инфракрасной и лазерной пайки особенно перспективны для микроэлектронной аппаратуры с элементами, монтируемыми поверхностью. Сочетание высокой прецизионности потока энергии с высокой регулируемостью открывает широкие возможности для создания программно-управляемого автоматического технологического оборудования для монтажа блоков РЭА 1У поколения.

Перспективы научных исследований и практических разработок в области монтажной пайки в производстве РЭА связаны с решением задач:

- повышения эффективности активации за счет увеличения плотности выделяемой в зоне пайки мощности до 10^{10} Вт/м и локализации зоны нагрева до 1-3 мм;
- применения новых материалов для монтажных работ (припоев, флюсов, паяльных масок, жидких теплоносителей и т.д.), обеспечивающих повышение качества и эксплуатационной надежности соединений;
- разработки программируемых технологических процессов и оборудования с управлением от микроЭВМ, являющегося модулями для ГАП сборки и монтажа;

- моделирования и оптимизации технологических факторов активированных процессов с целью повышения их стабильности и управляемости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуськов Г.Я., Блинов Г.А., Газаров А.А. Монтаж микроселектронной аппаратуры. - М.: Радио и связь, 1986. - 176 с.
2. Thwaites C.J. Soldering technology - a decade of developments // Int. Metals. Rev. 1984. V.29. № 2. - P.45-74.
3. Ланин В.Л., Тявловский М.Д. Интенсификация процессов пайки в производстве радиоэлектронной аппаратуры: Обзор. информ./БелНИИИТИ. - Мн., 1983. - 35 с.
3. Mayer G., Tao B. Survey of research into Electromagnetic and other Wave Effects on Mechanical Behaviors and Processing of Materials/ Defense Advanced Research Project Agency, January 1992. -99 p. IDA Docum. D-1115.
4. Клубович В. В., Тявловский М.Д., Ланин В.Л. Ультразвуковая пайка в радио- и приборостроении. - Мн.: Наука и техника, 1985. - 263 с.
5. Ланин В.Л. Активация процессов пайки корпусов микроселектронных изделий электромагнитными высокочастотными колебаниями // Радиотехника и электроника. - Мн.; МРТИ, 1983. Вып.12. - С. 122-125.
6. Зворыкин Д.В., Прохоров Ю.Н. Применение лучистого инфракрасного нагрева в электронной промышленности. - М.: Энергия, 1980. - 176 с.
7. Самаркин Ю.Д., Сурменко Л. А. Лазерная пайка в производстве изделий электронной техники: Обзор по электрон. технике / ЦНИИ "Электроника". - М., 19В6./Сер.7. Вып.3 /1159/. - 68 с.
8. Чуларис А.А., Масленников В.Н., Елкин О.К. Ультразвуковая пайка кобальта индиевыми припоями // Совершенствование техники и технологии сварки в радиоэлектронике и приборостроении в свете решений ХХУП съезда КПСС. - Л.: ЛДНТП, 1986. - С. 17-23.
9. Справочник по пайке / Под ред. И.Е.Петрунина. - К.: Машиностроение, 1984. - 400 с.
10. Способ пайки деталей из труднопаяемых материалов: Информ. листок № 84-0818 / ВИМИ. - М., 1984. - 2 с.
11. Котельников Д.И., Задорожный Ю.Г., Логинова В.С. Ультразвуковая пайка низкотемпературными припоями пьезокерамики ЦТС-19 // Сварочное пр-во. - 1986. -№ 4. - С. 10-11.
12. Абрамов СВ., Хорбенко И.Г., Швегла Ш. Ультразвуковая обработка материалов.- М. : Машиностроение, 1984. - 280 с.
13. Ланин В.Л., Тявловский М.Д. Влияние вида ультразвуковых колебаний на прочность спаев со стеклокерамическими материалами // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн.наук. 1983. № 4. - С. 69-73.
14. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов / Абрамов О.В., Добаткин В.И., Казанцев В.Ф. и др. - М.: Наука, 1986. - 277 с.
15. Ланин В.Л., Тявловский М.Д. Исследование ультразвуковых микропотоков в жидкостях и расплавах // Доклады АН БССР. - 1984. - Т.28. - № 5. - С.427-429.

16. Алефиренко В.М., Ланин В.Л., Тявловский М.Д. Динамика кавитационных полостей в расплавах припоев // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн.наук. - 1987. -№ 1. - С. 125.
17. Пат. 60-76274 Японии, МКИ В23К1/20.
18. Ланин В.Л., Тявловский М.Д. Ультразвуковой преобразователь на магнитострикционных ферритах // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. наук. - 1987. - № 2. - С. 60-62.
19. А.с. 1186416 СССР, МКИЗ В23К3/06. Ультразвуковой паяльник / Ланин В.Л., Тявловский М.Д., Дунай И.Н.
20. Берест Н.Н. Универсальное устройство для ультразвукового лужения // Технология и организация производства. -1985. - Вып. 4. - С. 5ч.
21. А.с. 1197803 СССР, МКИ В23К3/08. Ультразвуковое устройство для лужения и пайки изделий / Семенов Г.И., Васильев А.П., Починкова З.И.
22. Трегубов СВ., Тявловский М.Д., Ланин В.Л. Устройство для ультразвукового лужения заготовок // Обмен производственно-техническим опытом. - 1986. - Вып.7. - С 41-42.
23. Ланин В.Л., Хмыль А.А. Технологический процесс ультразвукового лужения выводов элементов РЭА: Информ.листок № 123 / БелНИИТИ. - Мн., 1985. - 4 с.
24. К вопросу пайки кремниевых кристаллов припоями на основе алюминия / Беленький Л.Я., Благодатская Н.А., Болчов И.С. и др.// Электронная техника. Сер.6. - 1984. - Вып. 2 /187/. - С. 61-63.
25. Бейль В.И., Отмахова Н.Г., Сажин П.И. Групповая бесфлюсовая пайка микрополосковых плат на металлические основания // Электронная техника. Сер.10. - 1986. - Вып.3 /387/. - С. 70-73.
26. Ланин, В. Л., Тявловский М. Д. Исследование ультразвуковой бесфлюсовой пайки подложек гибридных интегральных схем в корпуса микросборок // Доклады АН БССР.– 1982 . Т. 2. № 11.– С. 1008 – 1010.
27. А.с. 727351 СССР, МКИ В23К 3/06. Способ ультразвуковой пайки / Ланин В.Л., Тявловский М.Д., Мартыненко Л.Я. 1980, БИ № 14.
28. Пат. 3240540 ФРГ, МКИ В23К 1/08.
29. Wave Soldering by Ultrasonically Induced Acoustic Streaming // IBM Tech. Disclos. Bul. - 27. N 11. 1985. - 6395.
30. Пат. 60-148662 Японии, МКИ В23К1/08.
31. Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С. Ультразвуковые электро-технологические установки. – Л.: Энергоиздат,1982. – 208 с.
32. Тиристорные генераторы ультразвуковой частоты / Шапиро СВ., Казанцев В.Г., Карташев В.В., Киямов Р.Н. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 144 с.
33. Бабилов О.И. Новые пьезокерамические преобразователи с модульными генераторами // Опыт применения УЗ-техники и технологии в машиностроении: Тез докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ, Саратов, 22-24 мая 1985 г. - М.: ВСНТО, 1985. - С. 204-206.

34. Асамов В.В., Вологдин В.В., Куш Э.В. Индукционная пайка в электротехнической промышленности // Электротехника. 1981. № 7. – С. 43–45.
35. Ланин В.Л., Тявловский М.Д. Особенности высокочастотного нагрева при герметизации пайкой корпусов БИС // Электронная техника. Сер.7. – Вып.3(100). – 1980. – С. 11–14.
36. Тявловский М.Д., Ланин В.Л. Исследования высокочастотной пайки корпусов микросборок из диамагнитных сплавов // Доклады АН БССР, т.25, № 10. 1981.– С. 911–913.
37. А.с. 549900 (СССР). Способ пайки деталей //Тявловский М.Д., Хмыль А.А., Станишевский В.К., Ланин В.Л. БИ № 14, 1977.
38. Ланин В.Л., Тявловский М.Д. Исследование распределения электромагнитного поля индукторов при нагреве корпусов микросборок из диамагнитных сплавов // Известия АН БССР, сер. физ.– техн. наук, № 3, 1982.– С. 70–72.
39. Peter H.J. Schutzgasklappinduktop zum HF-Induktionsloten von Hydraulickrohranschluestucka //ZIS - Mitt. – 1987, 29. N 4. S. 405-409.
40. Пат. 217452 ГДР, МКИ В23К3/00.
41. А.с. 1199505 СССР, МКИ В23К 3/00; 1/06. Устройство для индукционной пайки / Курдин Ю.А., Шапошников О.А.
42. Ивницкий Б.Я. Методика расчета температурного режима наплавки и пайки ТВЧ деталей слитной формы // Сварочное пр-во. 1984. № 1. - С.5-7.
43. Peter H.J. Energieökonomische Aspekte beim HF-Induktionsloten // Schweisstechnik. - 1984. - 34. - N 5. S. 235-239.
44. Vogel R. Induktives Weichloten von elektromechanischen Wandlern // ZIS - Mitt. - 1983. 25. N 4. S. 355-359.
45. Автоматизация технологических процессов герметизации миниатюрных приборов индукционной пайкой / Вайнштейн В.И., Гоголев Г.П., Карповец В.С., Малащенко А.А. //Совершенствование техники и технологии сварки в радиоэлектронике и приборостроении в свете решений XXУП съезда КПСС. - Л.: ЛДНТП, 1986. - С. 49-54.
46. Зворыкин Д.Б. Отражательные печи инфракрасного нагрева.– М.: Машиностроение, 1985.– 176 с.
47. Белов А.А., Бульбутенко В.С. Лучевой высокотемпературный паяльник с кварцевой лампой накаливания //Сварочное пр-во. - 1982. - № 7. - С. 40.
48. Полуавтоматическая установка инфракрасной пайки: Информ. листок № 85-1342 / ВИМИ. - М., 1985. - 2 с.
49. Richards D. Laser soldering makes its mark // Elektron. Prod. - 1987. - 16. - N 3. P. 49-50, 52.
50. Liah E., Marietta M. Laser Tackle Tough Soldering problems // Electron. Packag. and Prod. - 1984. -24. - N 6. P. 154-161.
51. Laser flux less soldering // J. vac. Sci. Technol., A. —1985. - 3. - N 3. P. 780.
52. Лазерная пайка электрорадиоэлементов на печатные платы / Белялов А.У., Дрыгин Б.А., Елисеева О.С. // Электрон., пром-сть. - 1986. - Вып.5 /153/.

- С. 71-72.

53. Пат. 59-92163 Японии, МКИ В23К3/04.

54. Пат. 60-234768 Японии, МКИ В23К3/04.

55. Автоматическая система волновой пайки: Просп. фирмы Hollis Engineering /США/.

56. Оборудование для волновой пайки: Просп. фирмы Electrovert /Канада/.

57. Avremescu S., Down W.H. Improved wave soldering // Can. Electron. Eng. - 1986. - 30. - N 9. P. 32-33, 36.

58. Установка групповой пайки волной припоя / Михайлов Г.Ф., Гордиевич А.П., Назаренко А.Ф. и др.// Обмен опытом в радиопромышленности. - 1985. - Вып. 6. - С. 22-24.

59. Установка пайки печатных блоков: Просп. фирмы SOLTEX /Голландия/.

60. Lambert L. Air knives Have an Edge on Solder Defect Control // Electronic Packaging and Production. - 1984.-24. - N 2. P. 178-179.

61. Smith -Vargo L. Focus on photoimageable Solder masks // Electron. Packag. and Prod. - 1986. - 26. - N 6. P. 87-89.

62. Thibodeau P.A. Computerizing the Wave Soldering process // Electri-Onics. - 1985. - N 4. P. 37-40.

63. Грачев А.А., Шайденко Н.П., Рывкин Е.Н. Монтаж элементов на поверхность печатных плат при сборке РЭА: Обзор по электрон, технике/ ЦНИИ "Электроника". - М., 1986./Сер.7. Вып. 5/1183/. - 49 с.

64. Лаймен Дж. Монтаж на поверхность меняет облик печатных плат // Электроника. - 1984. - № 3. - С. 22-39.

65. Cox N.R. Near IR Reflow Soldering of Surface Mounted Devices // Surface Mount Technology.- 1986.- N 10. -P. 27-30.

66. Поверхностный монтаж навесных элементов на печатные платы электронных наручных часов / Слонимский А.П., Самойленко В.Г., Урбан М.В., Царев В.П. // Прогрессивные методы в пайке. — Киев: ИЭС им.Е.О. Патона, 1986. - С. 94-98.