

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

**А.А. Аллас**

## **ЛАЗЕРНАЯ ПАЙКА В ПРОИЗВОДСТВЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**



Санкт-Петербург  
2007

**Аллас А. А. Лазерная пайка в производстве радиоэлектронной аппаратуры.**

/Под редакцией д.т.н., профессора В.П.Вейко и д.х.н., профессора

В.С.Новосадова.

СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. 134 с.

В монографии рассмотрены вопросы оптимизации технологических режимов лазерной пайки с учетом свойств припойных паст для получения высокопрочных паяных соединений.

Работа может быть использована как учебное пособие, восполняющее недостаток учебно-методической литературы по лазерной технике и лазерным технологиям. Оно посвящено новому направлению лазерной технологии – лазерной пайке изделий радиоэлектронной техники.

Учебное пособие является дополнительным материалом по курсам «Физико-технические основы лазерной технологии» и «Лазерное оборудование, автоматизация и контроль технологических процессов». В пособии рассмотрены физико-технические особенности формирования паяных соединений повышенной надежности в процессе автоматизированной лазерной пайки интегральных микросхем на печатные платы.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптотехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, по специальности 200201 – «Лазерная техника и лазерные технологии» и специальности 200200 – «Оптехника».

ISBN 5–7577–0327–X



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2007.

© Аллас А.А., 2007.

## Оглавление

|                                                                                                           |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1. Проблемы повышения надежности паяных соединений при автоматизации сборочно-монтажной пайки.....</b> | <b>4</b>   |
| 1. 1. Миниатюризация радиоэлектронной аппаратуры и оценка надежности паяных соединений .....              | 6          |
| <b>2. Особенности физико-химических процессов сборочно-монтажной пайки .....</b>                          | <b>17</b>  |
| 2. 1. Смачивание и растекание припоев .....                                                               | 19         |
| 2. 2. Кинетика формирования спаев. Основные способы пайки .....                                           | 28         |
| 2. 3. Кристаллизация припоя в зазоре .....                                                                | 39         |
| 2. 4. Старение оловянно-свинцовых припоев .....                                                           | 46         |
| 2. 5. Дефекты паяных соединений .....                                                                     | 48         |
| 2. 6. Технологические особенности автоматизированных способов сборочно-монтажной пайки .....              | 52         |
| 2. 7. Припойные материалы и их дозирование. ....                                                          | 62         |
| <b>3. Математическое моделирование кинетики формирования паяных соединений.....</b>                       | <b>70</b>  |
| <b>4. Физико-технологические особенности лазерной пайки .....</b>                                         | <b>90</b>  |
| 4. 2. Температурные режимы формирования паяных соединений .....                                           | 96         |
| 4. 3. Влияние свойств припойных паст и режимов пайки на прочностные свойства паяных соединений .....      | 105        |
| <b>5. Оборудование для автоматизированной лазерной пайки.....</b>                                         | <b>119</b> |
| <b>Список использованной литературы.....</b>                                                              | <b>129</b> |
| <b>История кафедры.....</b>                                                                               | <b>131</b> |

## **1. Проблемы повышения надежности паяных соединений при автоматизации сборочно-монтажной пайки**

В настоящее время в радиоэлектронном приборостроении прослеживается четкая тенденция миниатюризации аппаратуры. Этому в значительной степени способствует бурное развитие микроэлектроники. Наличие большого многообразия интегральных микросхем (ИМС) позволяет разработчикам радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) значительно сократить время на ее проектирование, снизить массогабаритные характеристики и повысить надежность. Современная аппаратура отличается повышенной сложностью, и с каждым годом требования, предъявляемые к ней по качеству и надежности, все более возрастают. В этих условиях наиболее важное значение имеет своевременное технологическое перевооружение производства, от которого в первую очередь зависит качество и надежность продукции. При этом основное внимание должно уделяться разработке и освоению в производстве новых материалов и элементной базы, повышению уровня механизации и автоматизации производственных процессов, обеспечивающих повышение надежности аппаратуры.

В современной радиоэлектронной аппаратуре широко применяются ИМС с планарными выводами. Это связано с тем, что использование их в РЭА обеспечивает повышение плотности монтажа за счет размещения их с обеих сторон на платах печатного монтажа (ППМ). Основным методом получения электрических соединений остается пайка легкоплавкими припоями. Анализ отечественного сборочно-монтажного производства показывает, что, несмотря на многообразие существующего парка оборудования для пайки, основным методом монтажа ИМС с планарными выводами является ручная пайка паяльником. Это объясняется тем, что значительная часть изделий электронной техники, в которых применяются данные микросхемы, изготавливается в условиях мелкосерийных производств, отличающихся малыми объемами выпуска и огромной номенклатурой изделий. При этом существующее автоматизированное сборочно-монтажное оборудование в силу его ограниченных возможностей, как правило, не приемлемо. В связи с этим, автор настоящего пособия в течении ряда лет работал над проблемой создания

прогрессивной автоматизированной технологии монтажа ИМС с планарными выводами на ППМ, обеспечивающей получение качественных и надежных паяных соединений в условиях мелкосерийного многономенклатурного производства. В настоящее время в приборостроении применяется около 16 типов корпусов пяти модификаций ИМС, имеющих 14, 16, 24, 48 планарных выводов. Монтажные платы также отличаются большим многообразием по конструктивным признакам и сортаменту материалов. Плотность монтажных соединений на ППМ достигает 20-50 точек на площади в один квадратный сантиметр, а общее количество паяк на одной плате - нескольких тысяч.

В этих условиях ручная пайка паяльником является весьма непроизводительным процессом. Даже при высокой квалификации монтажников строгое соблюдение режимов пайки становится невозможным и увеличивается вероятность ошибок при монтаже, что в конечном итоге существенно сказывается на снижении производительности труда, качестве и надежности продукции. Известно, что трудоемкость сборочно-монтажной пайки составляет 20-25% от общей трудоемкости изготовления модулей на ППМ. В данных условиях наиболее целесообразным является разработка гибкого программно-управляемого универсального способа пайки ИМС на ППМ.

Наиболее перспективным методом пайки, обеспечивающим возможность решения поставленной задачи, является лазерная пайка в сочетании с применением паяльных паст, дозирование которых возможно в автоматическом режиме пневматическим дозатором. Отличительной особенностью данного процесса является локальность теплового воздействия, высокая стабильность температурно-временных режимов, гибкое регулирование подводимой тепловой энергии, отсутствие контакта с паяемым изделием, высокая производительность процесса, возможность автоматизации, высокое качество и надежность паяных соединений.

## 1. 1. Миниатюризация радиоэлектронной аппаратуры и оценка надежности паяных соединений

Основной закономерностью развития техники является увеличение степени ее идеальности, т. е. снижение массогабаритных характеристик аппаратуры и потребляемой энергии при одновременном расширении ее функциональных возможностей и повышении надежности. Разрешать эти противоречивые требования, как правило, удастся в результате применения современной элементной базы, новых технологических процессов, материалов и оригинальных инженерных и конструкторских решений.

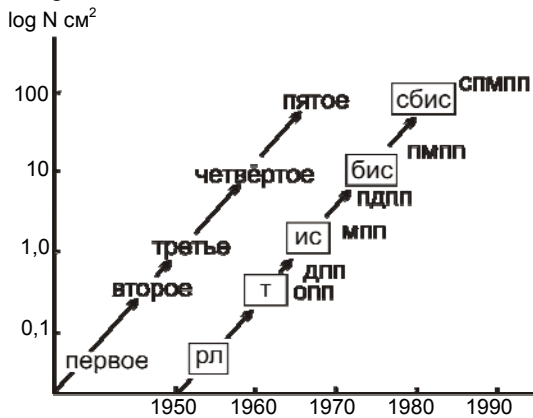


Рис. 1. 1. Этапы развития электронной техники

РЛ – реле и лампы

Т – транзисторы

ИС – интегральные схемы

БИС – большие ИС

СБИС – сверхбольшие ИС

ОПП – односторонние ПП

ДПП – двусторонние ПП

МПП – многослойные ПП

ПДПП – прецизионные ДПП, МПП

СПМПП – сверхпрецизионные МПП

Этапы развития электронной техники по мере совершенствования технического уровня элементной базы, конструкций и технологий принято разделять на поколения, которые сначала (как термин) характеризовали развитие вычислительной техники, затем распространились на все разновидности радиоэлектронной аппаратуры. Независимо от того, что каждому поколению аппаратуры свойственны в

первую очередь определенные потребительские качества, переход от поколения к поколению связывают с эволюцией элементной базы (рис. 1.1).

Каждое поколение электронной аппаратуры имеет свои конструктивные и технологические особенности. В аппаратуре первого поколения основу конструкции составляли блоки с металлическими шасси и панелями, на которых крепились электровакуумные приборы, реле, резисторы, конденсаторы, дроссели и трансформаторы. Монтаж осуществлялся проводами. Электронная аппаратура первого поколения отличалась громоздкостью и огромным количеством проводов. Основными технологическими процессами были металлообработка и малопроизводительный ручной проводной монтаж.

С появлением транзисторов создается аппаратура второго поколения. Для реализации преимуществ полупроводниковых приборов в качестве несущих конструкций и монтажа начали применять односторонние и двухсторонние печатные платы (ПП). Переход на печатный монтаж стал важнейшим этапом в развитии, конструировании и технологии электронной аппаратуры.

Разработка электронной аппаратуры третьего поколения на основе элементной базы высокой интеграции привела к дальнейшему развитию техники печатного монтажа, создающему оптимальные условия для расширения функциональных возможностей, сокращения массогабаритных характеристик, повышения надежности и эффективности электронной аппаратуры. Повышение требований к электрическим характеристикам и топологии линий связи между элементами электронных устройств третьего поколения обусловили необходимость применения многослойных печатных плат, позволивших решить ряд проблем электронного конструирования.

Аппаратура четвертого и пятого поколений на основе больших (БИС) и сверхбольших (СБИС) интегральных схем характеризуется еще более высокими требованиями к плотности монтажа, которая достигает в современных модулях РЭА 20÷50 монтажных соединений на один квадратный сантиметр поверхности печатной платы. Качественный скачок в повышении плотности монтажа был достигнут в 70-е годы в результате применения интегральных микросхем с планарными

выводами (рис. 1. 2), которые стало возможным монтировать с обеих сторон печатной платы. В настоящее время наблюдается тенденция к уменьшению длины планарных выводов ИМС и перехода к новому классу - безвыводных элементов, к технологии поверхностного монтажа. Повышение удельных тепловыделений в аппаратуре и необходимость согласования коэффициентов теплового расширения между элементами и монтажной платой ставит разработчиков перед необходимостью применения новых диэлектрических материалов, в частности, керамики.

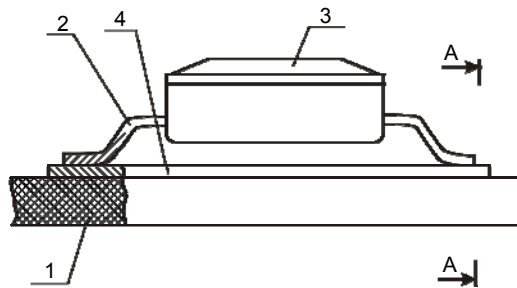


Рис 1. 2. Планарный монтаж ИМС на ППМ.

1 — Диэлектрическая основа ПП, 2 — Вывод ИМС, 3 — Корпус ИМС, 4 — Фольгированный проводник.

При всем разнообразии методов получения электрических соединений, в приборостроении массовым способом монтажа электроэлементов на печатные платы остается пайка легкоплавкими припоями, преимущественно методами групповой автоматизированной пайки. Ручную пайку применяют при изготовлении мелких ответственных партий модулей РЭА, при устранении дефектов соединений, возникающих при групповой пайке, а также при выполнении ремонтных работ, когда требуется произвести демонтаж вышедших из строя электрорадиоэлементов. Изготовление аппаратуры с применением планарного монтажа в условиях мелкосерийного производства также осуществляется ручной пайкой, т. к. в этих условиях применение групповых контактных паяльников, часто бывает экономически нецелесообразно из-за необходимости постоянной переналадки оборудования, в связи с чем оно значительное время

простаивает. Преимуществом ручной пайки является наличие визуального контроля за качеством паяных соединений при ее выполнении. К недостаткам следует отнести низкую производительность, нестабильность режимов пайки и, как следствие, большой разброс прочностных характеристик паяных соединений.

Непрерывное усложнение РЭА неизбежно ведет к увеличению количества паяных соединений, что в свою очередь приводит к снижению надежности модулей на ПП, т. к. 50÷80% отказов аппаратуры происходит из-за отказа электрических соединений.

Практика показывает, что повышение надежности элементов и модулей на ППМ без одновременного повышения надежности электрических паяных соединений не позволяет достичь требуемого уровня качества.

Качество аппаратуры и ее надежность между собой тесно взаимосвязаны. Качество изделия в общем случае определяется как соответствие его требованиям технической документации в момент проведения контроля и испытаний.

Надежность характеризует способность изделия отвечать заданным требованиям в процессе эксплуатации. В известном смысле проблема надежности фактически представляет собой проблему качества. Однако, результаты, полученные в процессе приемосдаточных испытаний, могут находиться в пределах установленных требованиями технических условий, т. е. соответствовать требованиям качества. Тем не менее, изделие может иметь скрытые дефекты, приводящие к преждевременным отказам аппаратуры.

Основной количественной характеристикой надежности аппаратуры является длительность ее безотказной работы ( $t$ ). При рассмотрении множества однотипных элементов РЭА за некоторый период срока их службы ( $t$ ) будет случайной величиной. Исчерпывающей характеристикой этой случайной величины, а, следовательно, и надежности исследуемых элементов является плотность вероятности срока службы  $f(t)$ . Распределение времени безотказной работы подчиняется экспоненциальному закону. Характеристики надежности при этом выражаются следующими формулами:

средний срок службы до отказа:

$$t_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda}, \text{ч} \quad (1.1)$$

вероятность безотказной работы:

$$p(t) = \exp(-\lambda t) \quad (1.2)$$

плотность вероятности времени безотказной работы:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (1.3)$$

интенсивность отказов, позволяющая количественно оценить надежность:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)} = \lambda \quad (1.4)$$

Величина  $\lambda$ , изменяющаяся с течением времени эксплуатации, показывает, какая доля от работающих соединений (элементов) в момент времени  $t$  выходит из строя в единицу времени после момента  $t$ . Результаты оценки надежности электромонтажных соединений, выполненной по приведенной выше методике, представлены в таблице 1. 1. Для сравнения в табл. 1. 2 приведены сведения по надежности элементов модулей на печатных платах. Исходя из принципа равнопрочности элементов конструкции, в совокупности представляющих печатный узел и, полагая, что надежность элементной базы улучшается в 10 раз каждые 10 лет, в табл. 1. 2 приведен прогноз повышения надежности до 2005 года для отечественной аппаратуры. Анализируя надежность элементов модулей на ПП и перспективы ее повышения видно, что надежность паяных соединений возможно повысить на 1-2 порядка. И это не является пределом. В табл. 1. 3 приведены ориентировочные сведения по надежности паяных соединений бытовой и военной аппаратуры США, опубликованные еще в 1968 году.

Анализируя надежность элементов модулей на ПП и перспективы ее повышения видно, что надежность паяных соединений возможно повысить на 1-2 порядка. И это не является пределом. В табл. 1. 3 приведены ориентировочные сведения по надежности паяных соединений бытовой и военной аппаратуры США, опубликованные еще в 1968 году. Очевидно, что стабильность ручной пайки объемного монтажа ниже, чем и объясняется повышенный разброс надежности по

сравнению с разбросом интенсивности отказов при пайке печатных плат автоматизированными методами. Печатный монтаж военной аппаратуры США со значительным удельным весом ручной пайки также характеризуется заметным разбросом стабильности паек. Тем не менее, за счет разработки системы мер по повышению надежности еще 30 лет назад специалистам США удалось повысить наработку на отказ до  $10^{-13}$  ч<sup>-1</sup> в аппаратуре ракеты "Minitmen".

Следует, однако, отметить, что определение показателей надежности по приведенной выше методике - процесс весьма трудоемкий и убыточный, так как требует вовлечения в эксперимент огромного количества образцов ПП. Так, для подтверждения с 95%-ной доверительной вероятностью интенсивности отказов  $10^{-7}$  ч<sup>-1</sup> требует испытать 1000 образцов в течение 10 лет. Для уменьшения времени испытаний до 1000 часов (1,5 месяца) необходимо увеличить объем выборки до  $9 \cdot 10^4$  шт. плат, что неэкономично. Поэтому определение надежности по этой методике доступно только службам надежности предприятий, располагающим статистическими данными по отказам аппаратуры.

Таблица 1. 1. Интенсивность отказов для различных типов соединений

| Элементы                   | Интенсивность отказов л,ч <sup>-1</sup> |                    |
|----------------------------|-----------------------------------------|--------------------|
|                            | Имеется                                 | Прогноз            |
| Интегральные схемы         | $10^{-8}$                               | $10^{-10}$         |
| Контакты соединителей      | $10^{-9}$                               | $5 \cdot 10^{-10}$ |
| Концевые печатные контакты | $10^{-7}$                               | $10^{-10}$         |
| Двухсторонние ПП           | $10^{-8}$                               | $10^{-10}$         |
| Многослойные ПП            | $10^{-7}$                               | $5 \cdot 10^{-11}$ |
| Элементы изоляции          | $10^{-11}$                              | $10^{-11}$         |
| Элементы соединений        | $4 \cdot 10^{-11}$                      | $10^{-11}$         |
| Паяные соединения          | $10^{-8}$                               | $10^{-10}$         |

Наиболее приемлемым для практического применения критерием надежности пайки является прочность соединений на отрыв.

Электрические соединения, выполненные низкотемпературной пайкой, должны обладать достаточной механической прочностью, электропроводностью, долговечностью, должны противостоять воздействию внешних факторов (многократным изменением температуры - 5000÷10000 циклов в диапазоне температур от -60° до +150°С, вибрации, влажности и т. д.).

Таблица 1. 3. Интенсивность отказов для различных типов аппаратуры

| №<br>пп | Тип аппаратуры                           | Значение интенсивности отказов<br>для паяк печатного монтажа (при<br>доверительной вероятности $\alpha=0,95$ ) |
|---------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | Бытовая (телевизоры)                     | $3 \cdot 10^{-7} — 1,5 \cdot 10^{-8}$                                                                          |
| 2       | Аппаратура автоматики                    | $2,2 \cdot 10^{-9}$                                                                                            |
| 3       | Военная аппаратура                       | $5 \cdot 10^{-8} — 1,5 \cdot 10^{-9}$                                                                          |
| 4       | Бортовая аппаратура<br>ракеты “Minitmen” | $10^{-13}$                                                                                                     |

Надежность неразъемных соединений в основном определяется стабильностью и совместимостью материалов, образующих эти соединения. Основными причинами разрушения паяных соединений в аппаратуре из-за недостаточной физико-химической стабильности материалов, образующих паяные соединения, являются:

- образование в паяном соединении хрупких интерметаллидных прослоек толщиной более 1-3 мкм;

Таблица 1. 2. Надежность элементов и прогноз

| Метод соединения           | Интенсивность отказов $1,ч^{-1}$ |
|----------------------------|----------------------------------|
| Накрутка                   | $10^{-9}$                        |
| Обжатие                    | $2 \cdot 10^{-8}$                |
| Сварка                     | $4 \cdot 10^{-8}$                |
| Пайка                      | $10^{-8}$                        |
| Ручная пайка паяльником    | $0,5 \cdot 10^{-9}$              |
| Групповая пайка паяльником | $10^{-8}$                        |
| Пайка волной припоя        | $10^{-8}$                        |

- разупрочнение зоны контакта слоя припоя с конструкционным материалом в процессе эксплуатации приборов, вызванное ростом интерметаллидных прослоек;

- разупрочнение припоев, вызванное распадом перенасыщенного твердого раствора и коагуляцией структурных составляющих;

- коррозия паяного соединения, обусловленная различием электродных потенциалов контактирующих материалов;

- различие тепловых коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) контактирующих в соединении материалов, которое при многократном изменении температуры вызывает деформацию припоя и, в конечном счете, усталостное микроразрушение паяного шва;

- анизотропия теплового расширения припоя;

- различие ТКЛР фазовых составляющих припоя;

- снижение пластичности припоя при низких температурах.

Надежность паяных соединений и изделий, в которые они входят, повышают за счет улучшения совместимости свойств материалов и повышения стабильности структуры паяных швов.

Главной причиной усталостного разрушения паяных соединений является многократное возникновение в соединениях термомеханических напряжений, обусловленных разницей ТКЛР материалов и вызывающих при достижении ими предела текучести припоя пластическую деформацию последнего и, в конечном счете, появление в нем микроразрушений. При числе циклических изменений температуры не менее  $10^4$  одним из важных параметров, определяющих срок службы паяного соединения, т. е. его долговечность, является величина пластической деформации за цикл. При этом следует учитывать, что тонкие паяные швы соединений при эксплуатации приборов работают в основном на сдвиг (срез). Деформацию сдвига  $j$ , которая может возникнуть в паяном шве при изменении температуры  $\Delta T$ , можно в первом приближении определить по следующей формуле:

$$j = \frac{\Delta\alpha \cdot \Delta T \cdot l}{2h} \quad (1.5)$$

где  $\Delta\alpha$  – разница ТКЛР материалов, контактирующих в соединении;

$l$  – максимальная длина шва паяного соединения;

$h$  – толщина паяного шва.

Связь между числом термических циклов до разрушения  $N$  и пластической деформацией за цикл  $\Delta\epsilon_p$  описывается формулой Коффина и Мэнсона, которую используют для оценки долговечности паяных соединений.

$$N = C(\Delta\epsilon_p)^{-n} \quad (1.6)$$

Из формулы (1. 6) следует, что чем больше  $\Delta\epsilon_p$ , тем меньше долговечность паяных соединений. Приближенная количественная оценка долговечности паяных соединений при вычисленной максимальной  $\Delta\epsilon_p$  производится по формуле:

$$N = \frac{1}{4} \left( \frac{\epsilon_b}{\Delta\epsilon_p} \right)^2 \quad (1.7)$$

где  $\Delta b$  – относительное удлинение при разрыве.

Однако в действительности число циклов до разрушения паяных соединений зависит от ряда параметров, влияние которых трудно выразить в математической форме, поэтому истинную долговечность соединений необходимо определять экспериментальным путем для конкретной конструкции прибора. Для этого паяные изделия испытывают с учетом предельно допустимых значений параметров. Из формул (1. 6) и (1. 7) следует, что долговечность паяных соединений можно увеличить за счет уменьшения в паяном шве пластической деформации. Воздействие повышенных температур до 100-150°C значительно ослабляет паяное соединение вследствие быстрой релаксации за счет пластической деформации паяного шва. Поэтому для работы в условиях термоциклических нагрузок желательно выбирать припой, предел текучести которых с повышением температуры до 100-150 °C снижается незначительно. Пластическую деформацию паяного шва можно значительно снизить, уменьшив ТКЛР контактируемых материалов и увеличив толщину паяного шва. С другой, следует иметь ввиду, что при уменьшении толщины шва его прочностные свойства возрастают за счёт эффекта контактного упрочнения и формирования в зазоре структуры твёрдых растворов.

Прочность паяных соединений также определяется типом соединения. Паяные соединения планарных выводов ИМС представляют собой нахлесточные соединения. Из условия равнопрочности длину

нахлестки выбирают равной двум-пяти толщинам наиболее тонкой из соединяемых деталей. Большая величина нахлестки нецелесообразна, поскольку нагрузка будет восприниматься в основном периферийными участками, а средняя часть нахлестки окажется малонагруженной.

Критериями оценки прочности являются величина усилия разрыва, выносливость паяных соединений при воздействии знакопеременных нагрузок и вибропрочность. Их численные значения зависят от свойств основных металлов, флюса, припоя и характера физико-химических процессов, происходящих при пайке.

Оценку прочности на разрыв производят по среднему значению усилия разрыва и среднему квадратичному отклонению; оценку выносливости паяных соединений при воздействии знакопеременных нагрузок – по среднему числу циклов кручения и среднему числу циклов изгиба, с частотой  $50 \div 100$  циклов в минуту при одновременном воздействии осевой нагрузки, равной 0,1- 0,5 от величины статического разрыва.

Вибропрочность оценивают по времени, в течение которого паяные узлы противостоят разрушению при воздействии вибрации с частотой от 50 до 2000 Гц и ускорением, соответствующим максимальным ускорениям, имеющим место при нормальной эксплуатации аппаратуры.

Как уже было отмечено выше, качество паяных соединений ухудшается вследствие образования в них интерметаллидов между компонентами припоев и металлическими покрытиями. Чем толще прослойка интерметаллидов в паяном соединении, тем меньше их прочность. Испытаниями на срез выявлена зависимость прочности от скорости деформирования. Чем больше скорость деформирования, тем больше сопротивление срезу. Фрактографическим анализом установлено пластическое разрушение паяных соединений при небольших скоростях деформации и хрупкое разрушение по интерметаллидным прослойкам при высоких скоростях деформирования. Поэтому для повышения надежности паяных соединений требуется добиваться предотвращения образования интерметаллидных прослоек и одновременного повышения прочности припоя в паяном шве за счет оптимизации физико-химических процессов пайки. При пайке различных по конструкции

изделий, температурно-временные режимы нагрева являются индивидуальными и определяются практическим путем. Поддержание оптимальных режимов с высокой стабильностью возможно только с применением автоматизированного оборудования.

Таким образом, завершая анализ факторов, влияющих на надежность паяных соединений в сборочно-монтажном производстве, можно сделать следующие выводы:

1. Требуемый уровень надежности паяных соединений ( $10^{-9} - 10^{-10}$  ч<sup>-1</sup>) может быть достигнут за счет улучшения совместимости свойств материалов, физической и химической стабильности структуры в результате оптимизации режимов пайки и повышения их стабильности.

2. С целью обеспечения гарантированного качества соединений в первую очередь необходимо добиться предотвращения образования интерметаллидов при одновременном повышении прочности припоя в паяном шве.

## **2. Особенности физико-химических процессов сборочно-монтажной пайки**

В общем случае технологический процесс изготовления радиоэлектронной аппаратуры на платах печатного монтажа включает в себя следующие технологические операции:

- подготовку печатных плат (расконсервация, оплавление);
- подготовку компонентов (распаковку, формовку и обрезку выводов и предварительное их лужение);
- входной контроль качества и функционирования компонентов;
- дозирование адгезива для приклеивания компонентов к монтажной плате;
- ориентация выводов, установка и фиксация компонентов на плате;
- дозирование припоя и флюса;
- формирование паяных соединений;
- отмывка остатков флюса;
- контроль качества паяных соединений;
- контроль функционирования модуля;
- консервация, упаковка модуля.

В зависимости от конструктивных особенностей модулей, компонентов и конкретных условий производства, последовательность перечисленных операций может изменяться, а некоторые операции могут вовсе отсутствовать.

На надежность паяных соединений из перечисленных выше операций основное влияние оказывают особенности операций дозирования припоя, флюса и непосредственно процесса пайки, в результате которого формируются паяные соединения с необходимыми эксплуатационными свойствами. В этой связи дальнейшее рассмотрение технологии сборочно-монтажной пайки радиоэлектронной аппаратуры на платах печатного монтажа в данной работе ограничено только этими технологическими операциями.

Пайка является одной из наиболее распространенных технологических операций в современном производстве. Популярность

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

Имеется большой арсенал средств технологического оснащения припойных и флюсующих материалов. Это дает возможность в каждом конкретном случае выбирать наиболее приемлемые варианты организации процесса пайки. Тем не менее, постоянное совершенствование радиоэлектронной аппаратуры, повышение ее надежности, плотности монтажа и объемов производства влекут за собой необходимость совершенствования технологии пайки.

Пайкой называют процесс соединения металлов в твердом состоянии путем введения в зазор припоя, взаимодействующего с основным металлом и образующего жидкую металлическую прослойку, кристаллизация которой приводит к образованию паяного шва. Пайка, при которой расплавленный припой заполняет зазор и удерживается в нем под действием капиллярных сил, называется капиллярной пайкой. В общем случае формирование паяного соединения определяется пятью последовательными стадиями:

- стадией нагрева до температуры плавления припоя,
- стадией образования физического контакта припоя с паяемыми поверхностями;
- стадией образования прочных химических связей при смачивании;
- стадией массообмена на межфазной границе (растворение, гетеродиффузия атомов расплава в твердую фазу), во время которой возможно образование интерметаллидов в системах с сильным химическим взаимодействием;
- стадией кристаллизации расплава.

## 2. 1. Смачивание и растекание припоев

Для получения надежных паяных соединений припой должен эффективно смачивать поверхности, заполнять зазоры между соединяемыми поверхностями, создавать стабильные структуры, свободные от раковин-пузырей, посторонних включений.

Первой кинетической стадией формирования паяного соединения является процесс образования расплава при автономном плавлении припоя) или в процессе протекания химической реакции (контактного плавления). Вторая стадия – смачивание и растекание расплавов в металлических системах являются следствием образования химических (металлических) связей в зоне контакта твёрдой и жидкой фаз. Под растеканием подразумевается процесс самопроизвольного распространения жидкости в виде фазового слоя по поверхности твёрдой или жидкой фаз. Движущей силой смачивания и растекания является уменьшение свободной энергии системы в основном за счёт уменьшения свободной поверхностной энергии.

Смачивание в условиях химического равновесия реализуется в системах, в которых исключены процессы массопереноса через межфазную границу. К таким системам относятся системы с отсутствием взаимной растворимости (например, Fe+Pb, Ag и т. д.) или твёрдые и жидкие фазы, имеющие равновесные составы  $C_1^p$  и  $C_2^p$  при температуре смачивания  $T_1$  (рис 2. 1, а).

Исходя из условий термодинамического равновесия, степень смачивания твёрдого недеформированного тела жидкостью в соответствии с уравнением Юнга может быть выражена как соотношение между горизонтальными компонентами трёх межфазных напряжений (рис. 2. 2)

$$\sigma_{SV} - \sigma_{SL} = \sigma_{LV} \cos \theta \text{ или } \cos \theta = \frac{\sigma_{SV} - \sigma_{SL}}{\sigma_{LV}}, \quad (2. 1)$$

где  $\sigma_{ij}$  – соответствующие значения межфазных натяжений на границах:  $\sigma_{SV}$  – твёрдое тело с газом (паром атомов припоя или расплавом флюса),  $\sigma_{SL}$  – твёрдое тело с расплавом припоя,  $\sigma_{LV}$  – жидкости с газом (или флюсом),  $\theta$  – контактный угол.

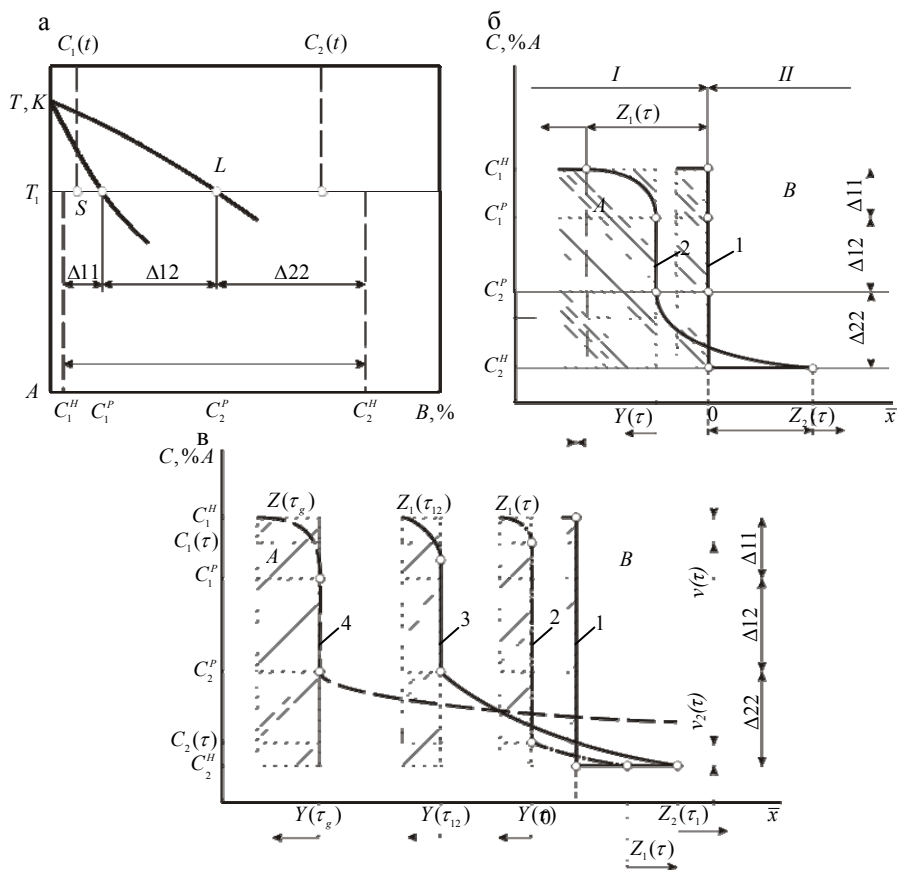


Рис. 2. 1 Схема граничной и диффузионной кинетики растворения. а - участок диаграммы состояния. Обозначены: равновесные  $C_1^P$ ,  $C_2^P$  и начальные  $C_1^H$ ,  $C_2^H$  - концентрации при температуре  $T=T_1$ ,  $C_1(\tau)$  и  $C_2(\tau)$  - неравновесные концентрации на межфазной границе  $Y(t)$  соответственно в твердой (1) и жидкой (2) фазах; б - распределение концентраций при диффузионной кинетике растворения: I -  $\tau=0$ , 2 -  $\tau>0$ ;  $Z_1(\tau)$  - фронт концентрационного возмущения в фазах 1 и 2 (граница диффузионной зоны); в - распределение концентраций при граничной кинетике растворения: I -  $\tau=0$ , 2 -  $0<\tau<\tau_{11}$ ; 3 -  $\tau=\tau_{12}$ ; 4 -  $\tau=\tau_{11}>\tau_{12}$ ,  $C_1(\tau_{11})=C_2^P$ . Остальные обозначения в тексте.

Второе фундаментальное уравнение капиллярности

$$W_A = \sigma_{LV}(1 + \cos \theta) \text{ при } \theta \neq 0 \quad (2.2)$$

связывает работу адгезии  $W_A$ , поверхностное натяжение жидкости  $\sigma_{LV}$  и контактный угол  $\theta$ . В этих уравнениях величина поверхностного натяжения  $\sigma_{ij}$  определяет работу образования поверхности. По Гиббсу величина поверхностного натяжения  $\sigma$  связана с удельной свободной поверхностной энергией  $f_\omega$  уравнением:

$$\sigma = f_\omega + \omega \frac{df_\omega}{d\omega} - \sum_{i=2}^{i=n} \Gamma_{i(1)} \cdot \mu_i,$$

где  $\omega$  - площадь поверхности раздела,  $\Gamma_{i(1)}$  и  $\mu_i$  - адсорбция и химический потенциал  $i$ -го компонента при условии, что разделяющая поверхность выбрана так, что адсорбция первого компонента равна 0. В случае изотропной среды, для которой характерно независимость свойств от направления, например, жидкость, удельная свободная поверхностная энергия  $f_\omega$  не зависит от изменения площади поверхности, т. е.  $\frac{df_\omega}{d\omega} = 0$ . В этом случае для однокомпонентной системы ( $\Gamma_i = 0$ ) имеем  $\sigma = f_\omega$

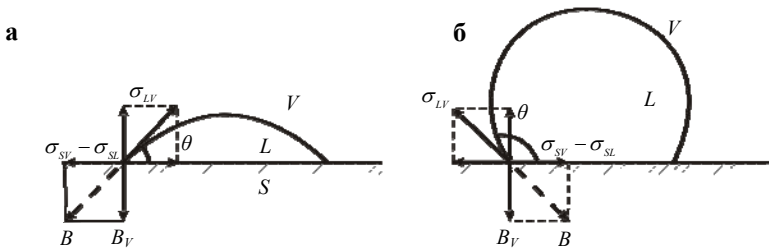


Рис 2. 2.

Равновесие сил на краю лежащей капли при  $\theta < 90^\circ$  (а) и  $\theta > 90^\circ$  (б);  
 $B$  – равнодействующая противоположная направлению действия  $\sigma_{LV}$ ,  $B_v$  – нормальная составляющая.

В этом частном случае поверхностное натяжение численно равно свободной поверхностной энергии. Для многокомпонентных жидких металлических систем имеем

$$\sigma = f_{\omega} - \mu_i \Gamma_i$$

В большинстве методов исследования измеряется именно  $\sigma$  – поверхностное натяжение.

Дюпре вывел уравнения обратимого отделения жидкости от поверхности твёрдого тела – работы адгезии, которая также может быть получено из уравнения 2. 1 и 2. 2

$$W_A = \sigma_{SV} + \sigma_{LV} - \sigma_{SL} \quad (2. 3)$$

Подчеркнем, что работа обратимого отделения  $W_A$  строго может быть применена только для систем с физическим взаимодействием, обусловленным силами Ван-дер-Ваальса (поляризационное, индукционное и дисперсионное взаимодействие).

В случае химического взаимодействия энергия связи между твердой и жидкой фазами на два-три порядка больше физического взаимодействия. В случае необратимого изотермического процесса образование соединения между двумя конденсированными фазами (твердая+твердая, твердая+жидкость) чисто адгезионного разрушения достигнуть не удастся. И измеряемая работа разрушения по существу есть работа когезии  $W_K$  наименее прочного тела(например, жидкости)

$$W_K = 2 \sigma_{LV}$$

В технологических процессах пайки система твёрдое тело – жидкость – пар (флюс) чаще всего находится в условиях далёких от химического равновесия, т. е. в условиях, когда необходимо анализировать влияние химических реакций на межфазные натяжения  $\sigma_{ij}$ . Уменьшение свободной энергии является движущей силой, приводящей к деформированию капли и увеличению площади межфазной поверхности. Этот процесс протекает до минимального энергетического состояния. Из анализа условий термодинамического равновесия следует, что в случае  $\sigma_{LV} > \sigma_{SL} > \sigma_{SV}$  значение  $\theta$  всегда больше  $90^\circ$ , при  $\sigma_{SL} = \sigma_{SV} + \sigma_{LV}$  контактный угол  $\theta=180^\circ$ . В том случае, когда  $\sigma_{SV} > \sigma_{SL} > \sigma_{LV}$  или  $\sigma_{SV} > \sigma_{SL} < \sigma_{LV}$  т. е. вне зависимости от

соотношения  $\sigma_{SV} \geq \sigma_{LV}^*$  значения  $\theta < 90^\circ$ . В том случае, когда  $\sigma_{SV} - \sigma_{SL} > \sigma_{LV}$ , контактный угол имеет неравновесные значения, так как уменьшение свободной энергии при смачивании недеформируемого твёрдого тела превосходит её увеличение, связанное с ростом поверхности жидкой фазы. В этом случае жидкость будет растекаться до её полного исчезновения как фазы.

Таким образом, уменьшение полной энергии поверхности твердого тела в процессе смачивания ( $\sigma_{SV} > \sigma_{SL}$ ) определяется как условие смачивания и, наоборот, при  $\sigma_{SV} < \sigma_{SL}$  имеем условие несмачивания. Тогда  $\sigma_{SV} - \sigma_{SL} = F_g$  можно рассматривать как движущую силу растекания. Из термодинамических расчётов следует, что низкие значения межфазных напряжений ( $\sigma_{SL}$ ) в металлических системах, практически во всех случаях должны обеспечивать полное смачивание. Отсутствие смачивания в подобных системах является следствием наличия промежуточных оксидных или иных прослоек на межфазной границе. Современными методами исследования на поверхности металлов в сверхвысоком вакууме  $10^{-7}$  Па на очищенных поверхностях обнаруживают загрязнения в виде C, S, Cl, O, N и Si. Источником возможных загрязнений является окружающая среда и объёмы конденсированных твердых и жидких фаз.

Равновесие горизонтальных сил на «тройную точку» (твёрдое тело – жидкость – пар или флюс) в равновесном состоянии обеспечивается уравнением Юнга. Имеет место такое равновесие вертикальных сил в этой точке (рис 2. 2). Сила притяжения  $B_v$  уравнивается вертикальным компонентом поверхностного натяжения жидкости. В результате возникает равнодействующая сила  $B$  равнопротивоположная силе поверхностного натяжения.

Если  $\sigma_{SL} > \sigma_{SV}$  и  $\sigma_{LV}$ , имеет место контакт двух поверхностей, притяжение которых друг к другу определяется физическим взаимодействием, приводя к уменьшению полного межфазного натяжения. В этом случае контактирующие поверхности не теряют свою индивидуальность и контактный угол с уменьшением вклада этих сил приближается к  $180^\circ$ . Если  $\sigma_{SL}$  находится между  $\sigma_{SV}$  и  $\sigma_{LV}$ ,

образование реальной границы раздела при условии химического равновесия в первом приближении можно рассматривать по аналогии с образованием растворов и соответствует образованию некоторой промежуточной межфазной структуры, межфазное натяжение которой  $\sigma_{SL}$  находится между  $\sigma_{SV}$  и  $\sigma_{LV}$ . Реальная величина  $\sigma_{SL}$  будет зависеть от минимизации структурной непрерывности через границу раздела (степени установления химической связи) и  $\sigma_{SL}$  будет уменьшаться с увеличением полноты образования химических связей на границе раздела. В случае, когда  $\sigma_{LV} > \sigma_{SV}$ , значение  $\sigma_{SL}$  при образовании химических связей будет приближаться к  $\sigma_{SV}$  при контактном угле  $90^\circ$ . Для  $\sigma_{SV} > \sigma_{SL}$  значения  $\sigma_{SL}$  приближаются к  $\sigma_{LV}$ . Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что максимальное уменьшение  $\sigma_{SV}$  при взаимодействии с жидкой фазой, в случае контактного угла  $\theta \rightarrow 0$ , составляет  $\approx \sigma_{LV}$ , как это следует из уравнения (2. 1).

Если  $\sigma_{SV} > \sigma_{SL} < \sigma_{LV}$ , имеет место переходное состояние, включающее в себя химическую реакцию. Из уравнения 2. 1

$$\cos \theta = \left( \sigma_{SV}^{\uparrow} - \sigma_{SL}^{\downarrow} \right) / \sigma_{SL}^{\downarrow} \quad (2. 2)$$

следует, что для уменьшения значений  $\theta$  ( $\theta \rightarrow 0$ , а  $\cos \theta \rightarrow 1$ ) необходимо увеличивать значения  $\sigma_{SV}$  (за счёт очистки поверхности и удаления оксидов) и уменьшать величину  $\sigma_{LV}$  за счёт применения активных газовых сред и флюсов, а также снижать значения межфазного напряжения  $\sigma_{SL}$  за счёт легирования поверхности твердой и жидкой фаз поверхностно-активными элементами из флюса или газовой среды (щелочные металлы, кислород и т. д.). При легировании расплава припоя кислородом облегчается реакция смачивания оксидов ( $Me' O$ ) металлическими расплавами ( $Me''$ ) в результате реакции :  $Me'' + Me'O \rightarrow Me''O + Me'$ .

В реальных технологических процессах смачивание и растекание происходит в неравновесных условиях. В этом случае условие химического равновесия при постоянной температуре и давлении не

удовлетворяется. Фазы системы твердое тело – жидкость – пар будут взаимодействовать через границу раздела для достижения состояния химического равновесия приводя к изменению динамического значения  $\sigma_{SL}^d$ ,  $\sigma_{LV}^d$  и  $\theta^d$ . Обычно химические составы твердой и жидкой фаз далеки от равновесных значений  $C_1^P$  и  $C_2^P$ .. При взаимодействии фаз с начальной концентрацией  $C_1^H$  и  $C_2^H$  (Рис. 2.1, а) в процессе неравновесного растекания ( $t=10^{-3}$  с) будет сопровождаться массопереносом через межфазную границу, приводя к формированию диффузионных зон (Рис. 2. 1 б, в) в соответствующих фазах.

Массоперенос через границы раздела можно условно рассматривать как химическую адсорбцию от одной фазы к другой в межфазной области. Перенос массы сопровождается уменьшением свободной энергии системы. Однако в самом начале процесса взаимодействия при возникновении межфазной границы раздела химической реакции охватывается только межфазная область и, таким образом, соответствующее первоначальное уменьшение свободной энергии системы обусловлено уменьшением свободной энергии только в межфазной области (Рис. 2. 2 б,в), т. е. в области спая.

В общем случае при анализе влияния состава газовой среды, флюсов и процессов массопереноса в межфазной области на процессы растекания необходимо анализировать изменение динамических значений  $\sigma_{ij}^d$  межфазных натяжений для всех трех границ раздела. Тогда в условиях квазиравновесия можно использовать уравнение Юнга в виде

$$\cos \theta^d = \frac{(\sigma_{SV}^d - \sigma_{SL}^d)}{\sigma_{LV}^d} \quad (2. 3)$$

В уравнении (2. 3) изменение динамических значений ( $\sigma_{ij}^d$ ) обусловлены реакциями, протекающими на межфазных границах в результате взаимодействия твердой поверхности с газом, парами расплава или флюсом ( $\sigma_{SV}^d$ ), изменение  $\sigma_{LV}^d$  при взаимодействии поверхности расплава с газовой средой (или флюсом) и процессами на

межфазной границе ( $\sigma_{SL}^d$ ) с учётом массопереноса через неё и адсорбцией на ней поверхностно-активных элементов газовой среды (флюсов) растворимых в расплаве.

На стадии неравновесного растекания состава  $C_i(\tau)$  со стороны твёрдой и жидких фаз на движущейся межфазной границе  $Y(\tau)$  в процессе массопереноса стремятся к равновесным значениям  $C_1^P$  и  $C_2^P$  (Рис 2. 1 в п. 2.... 4). Эта стадия называется стадией граничной кинетики растворения. В этом случае скорость растекания в основном лимитируется вязкостью расплава и силой инерции :

$$\sigma_{SV} - \sigma_{SL} - \sigma_{LV} \cdot \cos \theta - F_i - F_v = 0,$$

где  $F_i$  – сила инерции,  $F_v$ – сила вязкости

На этой стадии происходит основное уменьшение значений  $\theta$  и увеличение площади растекания, и формирование адгезионного спая. Адгезионным спаем называется спай, при котором изменение химического состава сосредоточено в узкой области на межфазной границе ( Рис 2. 1 в п. 1 .... 3) и исключено образование интерметаллидов. При достижении на межфазной границе равновесных составов  $C_i(\tau) = C_i^P$  начинается стадия равновесного растекания (Рис 2. 1, б п. 2 и в п. 4)

Шероховатость поверхности является одним из факторов, определяющих качество паяного соединения. Шероховатость поверхности оказывает влияние на растекание расплавов и прочность соединения. При пайке низкоуглеродистой стали эвтектическим проем системы Pb-Sn установлено, что растекание припоев Pb-Sn и Ag-припоев вдоль рельефа грубообработанной поверхности больше, чем на гладкой поверхности. Шероховатость  $R_z$  изменяли в пределах от 15 до 0,6 мкм. Во всех случаях независимо от температуры и величины зазора прочность соединений с грубой поверхностью для Pb-Sn и припоев была меньше, чем с гладкой. Следует отметить, что на серебряных припоях наблюдалась обратная картина. Максимальные значения прочности при пайке припоем Pb-Sn составляли ~ 208 МПа при 520 К в интервале зазоров 0,2-0,45 мм. Снижение механических свойств соединений с ростом шероховатости для припоев системы Pb-Sn связано с

образованием интерметаллидов  $\text{FeSn}$  и  $\text{FeSn}_2$  на межфазной границе. В случае грубой поверхности обеднение шва оловом происходит более интенсивно вследствие увеличения площади паяемой поверхности.

Термодинамический анализ растекания жидкости перпендикулярно канавкам показывает, что оно может происходить самостоятельно при условии

$$\theta^d > \theta + \alpha < 90^\circ, \quad (2.4)$$

где  $\theta^d$  - динамический краевой угол смачивания (рис. 2. 3);  $\theta$  - равновесный краевой угол смачивания гладкой поверхности;  $\alpha$  - локальная крутизна микрорельефа.

Если  $\theta + \alpha - \theta^d = \Delta$ , где  $\Delta = 5 \dots 10^\circ$ , то растекание перпендикулярно канавкам прекращается. При  $\Delta < 5 \dots 10^\circ$  жидкость перед гребнем останавливается, а затем постепенно перетекает в канавку и заполняет ее.

Из условия (2. 4) имеем ограничение на смачивающие свойства припоев:  $\theta < 90^\circ - \alpha$ . На участках с грубым рельефом даже при использовании припоев с хорошими смачивающими свойствами ( $\theta \leq 40^\circ$ ) возможно образование пор и непропаев, что обусловлено дефектами поверхности на отдельных участках.

Особого внимания требуют вопросы, связанные с температурой в зоне пайки. С одной стороны, увеличение температуры улучшает адгезию и смачивание, с другой, перегрев ряда припоев ведет к снижению прочности на 15-20%.

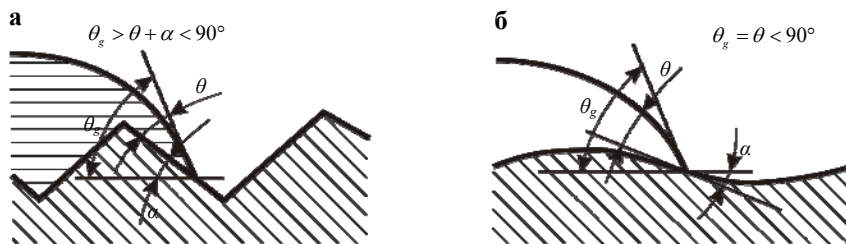


Рис 2. 3. Модель растекания припоев при: а) механической обработке поверхности (грубый рельеф) и б) при алмазно-электролитической обработке (гладкая поверхность зерен с канавками по границам зерен)

## **2. 2. Кинетика формирования спаев. Основные способы пайки**

Образующееся при пайке соединение по своему строению и составу неоднородно, включает литую прослойку (шов), спай и диффузионные зоны (Рис. 2. 4). Шов - неоднородная по составу и строению прослойка между соединяемыми деталями, образующаяся в результате взаимодействия припоя с паяемым материалом и последующей кристаллизации расплава в зазоре. Связь между швом и поверхностью детали возникает в результате образования спаев. Спай – или межфазная граница образуется в результате взаимодействия паяемого материала с расплавом припоя (Рис. 2. 1 и 2. 4)

Диффузионная зона - граничащий со спаем слой паяемого материала с измененным химическим составом и микроструктурой, образовавшийся в результате взаимной диффузии компонентов припоя и паяемого материала.

В зависимости от условий и режима пайки, а также от соотношения физико-химических свойств паяемого материала и припоя, спай, образующийся между ними, может иметь различное строение. В начальный момент на поверхности раздела твердой и жидкой фаз при температуре пайки (рис. 3. 3) паяемый материал и расплав припоя имеют составы, близкие к исходным. Пайка может завершаться как на более ранней стадии, так и на последующих, более глубоких стадиях развития процессов взаимодействия паяемого материала и припоя в зоне спая. В соответствии с этим будут меняться состав и структура спаев

Рассмотрим основные способы пайки. Стандарт (ГОСТ 17349-79) устанавливает технологическую классификацию способов пайки и порядок формирования наименования способа пайки.

Классификация способов пайки осуществлена по следующим независимым признакам:

- удалению оксидной пленки;
- получению припоя;
- заполнению зазора припоем;
- кристаллизации паяного шва;

- источнику нагрева;
- наличию давления на паяемые детали;
- одновременности выполнения паяных соединений.

В соответствии с физико-химическими особенностями процессов, протекающих при пайке можно выделить следующие способы пайки: капиллярная, контактно-реактивная, адгезионная, реактивно-флюсовая, диффузионная, некапиллярная и композиционная. При лазерной пайке пастой припоя в приборостроении наибольший интерес представляет: капиллярная, адгезионная, контактно-реактивная и диффузионная пайка.

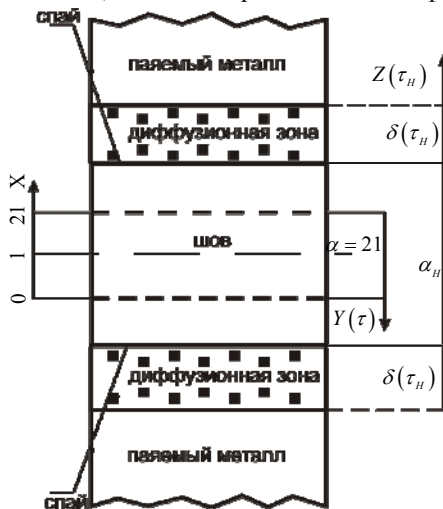


Рис. 2. 4. Схема расположения зон паяного соединения.

### **Капиллярная пайка**

Пайка, при которой расплавленный припой заполняет зазор и удерживается в нем под действием капиллярных сил, называется капиллярной пайкой. Обычно под этим способом подразумевают пайку с зазорами, не превышающими 0,5...0,7 мм. Величина зазора при прочих равных условиях определяет структуру, химический состав шва, механические свойства соединения, экономичность процесса, дефектность структуры (газовую пористость, ликвационные процессы) и т. д. Зазоры подразделяют на большие (0,2...0,7 мм), номинальные

(0,05...0,2 мм) и малые (менее 0,05 мм). Важнейшими факторами, определяющими зависимость прочности от зазора, являются особенности кристаллической структуры и химическая неоднородность в шве. Установлено, что в системах без образования хрупких интерметаллидов наблюдается увеличение прочности с уменьшением зазора. При  $a \leq a_{кр} \approx 80 \text{ мкм}$  при высокотемпературной пайке возможно получение равнопрочных соединений.

Как показывает анализ, в технологическом процессе пайки при времени контактирования твердой и жидкой фаз более 10 с для моделирования технологического процесса можно использовать модель диффузионной кинетики растворения в капиллярном зазоре  $a = 2l$ . В этом случае полагаем, что на межфазной границе в момент времени  $t = 0$  сразу устанавливаются равновесные концентрации в твердой  $C_1^p$  и жидкой  $C_2^p$  фазах (Рис 2. 1). Аналитическое решение с учётом диффузионных потоков в твёрдую и жидкую фазы рассмотрено в [13]. В соответствии с расчётами и экспериментом время насыщения в зависимости от величины зазора  $a$ , взаимной растворимости и коэффициентов диффузии в фазах обычно не превышают 0,2...5 с. Ширина диффузионных зон может достигать величины  $\leq 20...30 \text{ мкм}$

### **Адгезионная пайка**

Пайка, при которой формируется адгезионный спай, называется адгезионной. Адгезионный спай образуется в условиях, когда полностью исключены или сведены к минимуму процессы массообмена в области межфазных границ, в результате после кристаллизации состав припоя практически не изменяется. Соединения адгезионного типа могут быть получены как при использовании в качестве припоев металлов, не образующих с паяемыми металлами растворов ни в твердом, ни в жидком состоянии, так и за счет снижения температуры и ограничения времени контактирования твердой и жидкой фаз, в частности при использовании лазерных источников нагрева.

Формирование адгезионного соединения особенно важно, когда возможно образование хрупких интерметаллидов в зоне спая. При проектировании технологического процесса формирования адгезионных

соединений и при пайке в малых капиллярных зазорах необходимо учитывать граничную кинетику растворения. Критерий оценки малости капиллярного зазора приведен ниже (Глава 3).

Как отмечалось ранее, при чисто диффузионной кинетике процесса растворения в зазоре, предполагается, что в момент времени  $t = 0$  на межфазной границе сразу устанавливается профиль концентраций  $C_1^p$  и  $C_2^p$ , соответствующий равновесной диаграмме состояний (Рис. 2. 1 а,б). В реальных условиях при  $t = 0$  в контакте обычно находятся твердая фаза  $A$  состава  $C_1^H$  и расплав  $B$  состава  $C_2^H$ , а концентрационный профиль имеет вид ступени (Рис. 2. 1,в). При  $t > 0$  на движущейся межфазной границе  $Y(t)$  в процессе растворения увеличиваться концентрация атомов  $A$  в расплаве  $C_2(\tau) \big|_{y(\tau)} = C_i(\tau) > C_2^H$ . Время достижения на межфазной границе равновесной концентрации  $C_i(\tau_f) = C_2^p$  определяет продолжительность протекания стадии граничной кинетики.

Феноменологическая модель граничной кинетики растворения при формировании адгезионного соединения приведена в [15]. Растворение в зазоре с учётом граничной кинетики рассмотрено в главе 3.

Рассмотрим понятие адгезии. Как уже отмечалось, в равновесных системах твёрдая и жидкая фазы находятся в условиях термодинамического равновесия. В этом случае температура, давление и химические потенциалы фаз одинаковы ( $\mu_i^T = \mu_i^*$ ). В неравновесных системах химические потенциалы не равны  $\mu_i^T \neq \mu_i^*$ . В процессе растворения и диффузии атомов жидкости в твёрдую фазу будет происходить выравнивание химических потенциалов. Протекание процессов массопереноса является мощным источником снижения межфазного натяжения.  $\sigma_{12} \equiv \sigma_{SL}$ .

В необратимом процессе образование химических связей в зоне контакта жидкой и твёрдой фазы и есть работа адгезии. Из уравнения Дюпре

$$\sigma_{SL} = \sigma_{SV} + \sigma_{LV} - W_A$$

следует, что рост энергии связи жидкости и твёрдого тела  $W_A$  вызывает

снижение межфазного натяжения  $\sigma_{SL}$ . Таким образом, энергия, выделившаяся при протекании реакции между твёрдым телом и жидкостью, может быть приравнена к работе адгезии. В неравновесных условиях работу адгезии между двумя фазами твёрдой (S) и жидкой (L) можно представить в виде

$$W_A = W_A \text{ (равн.)} + W_A \text{ (неравн.)}$$

Межфазное натяжение выражается

$\Delta \sigma$  равн.

$$\sigma_{SL} = \overbrace{\sigma_{SV} + \sigma_{LV} - W_A \text{ (равн.)} - W_A \text{ (неравн.)}}^{\Delta \sigma \text{ равн.}}$$

$$\sigma_{SL} = \Delta \sigma \text{ равн.} - \Delta \sigma \text{ неравн.}, W_A \text{ (неравн.)} = \Delta \sigma \text{ неравн.},$$

где  $\Delta \sigma$  неравн. определяется различием металлохимических свойств (электронного строения и т. д.) соприкасающихся фаз;  $\Delta \sigma$  неравн. является функцией отклонения системы от равновесного состояния:

$\Delta \sigma \text{ неравн.} = \varphi(\mu_i^S - \mu_i^L)$  и в нашем случае определяется разностью концентраций  $C_1(\tau) - C_2(\tau)$  (рис. 2. 1 ).

В равновесных системах  $\sigma_{SL} = \Delta \sigma \text{ равн.}$  и  $\mu_i^S = \mu_i^L$  а  $\Delta \sigma \text{ неравн.}$ , определяющаяся разницей  $\mu_i^S - \mu_i^L$  равно нулю. В этом случае  $\sigma_{SL} = \Delta \sigma \text{ равн.}$

При сближении металлохимических свойств фаз (например, системы с неограниченной взаимной растворимостью), натяжение  $\Delta \sigma \text{ равн.} \rightarrow \min$  и в пределе, когда фазы становятся тождественны, межфазное натяжение  $\sigma_{SL}$  исчезает,  $W_A \text{ (равн.)}$  становится равным работе когезии каждой из фаз.

В неравновесных системах изменение динамических значений  $\sigma_{SL}^d$  от времени имеет вид кривой с минимумом при  $t_m$ , который соответствует максимуму для  $W_A^d$ . Предполагается, что начальный момент взаимодействия фаз (  $t = t_0$  ) характеризует начальную стадию хемосорбции при исходных значениях межфазного динамического поверхностного натяжения  $\sigma_{sl}^d \equiv \sigma_{sl}^0$  (Рис 2. 5). В этом случае в уравнении Юнга должны фигурировать исходные динамические

поверхностные натяжения  $\sigma_{ij}^d = \sigma_{ij}^0 \equiv \sigma_{SV}^0, \sigma_{SL}^0, \sigma_{LV}^0$  и  $\theta^d = \theta^0$ . При  $t > t_0$  реакция на границе раздела продолжается. Кривая 1 на рис. 2. 5 иллюстрирует отсутствие минимума на переходном этапе изменения  $\sigma_{SL}^d$  до  $\sigma_{SL}^S$  (статическое) в случае физической адсорбции или при взаимодействии фаз, находящихся в химическом равновесии. В этом случае контактный угол  $\theta$  называют краевым. Динамическая удельная свободная энергия границы раздела  $g_{SL}^d = g_{SL}^0$  изменяется на  $-\Delta g_{SL}$ , благодаря свободной энергии реакции, что приводит к соответствующему изменению значений

$$\sigma_{SL}^d = \sigma_{SL}^0 + |-\Delta g_{SL}|$$

При возникновении межфазной границы раздела химической реакцией, как уже отмечалось, охватывается только межфазная область и, таким образом, соответствующие первоначальное уменьшение свободной энергии системы обусловлено уменьшением свободной энергии в межфазной области.

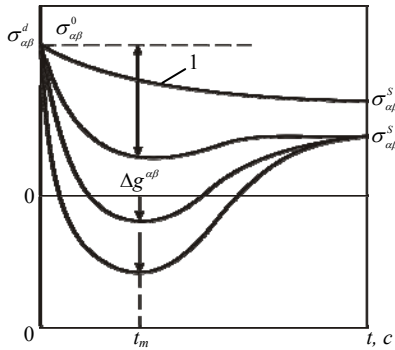


Рис. 2. 5, Изменение динамического межфазного натяжения  $\sigma_{\alpha\beta}^d$  ( $\sigma_{\alpha\beta}^d \equiv \sigma_{SL}^d$ ) в процессе химической реакции. Обозначения:  $\sigma_{\alpha\beta}^0$  и  $\sigma_{\alpha\beta}^S$  - исходное (динамическое) и равновесное (статическое) межфазное натяжение,  $\Delta g^{\alpha\beta}$  - интенсивность снижения  $\sigma_{\alpha\beta}^d$  при  $t_m$ .

Величина уменьшения удельной свободной энергии единицы поверхности раздела фаз может быть определена как  $\Delta g_{SL} = -\frac{\Delta G_{SL}}{\omega_{SL}}$ .

Кривая 1 иллюстрирует отсутствие минимума на переходном этапе снижения  $\sigma_{\alpha\beta}^d$ , в случае физической адсорбции (или чисто адсорбционного процесса), а также при взаимодействии фаз, находящихся в химическом равновесии. Натяжение аналогично уменьшается на величину  $-\Delta g_{SL}$  и  $\sigma_{SL}^d = g_{SL} - \sum_i \mu_{i(SL)} \Gamma_i$ .

В равновесных системах изменение  $\sigma_{SL}^d$  от  $\sigma_{SL}^0$  до  $\sigma_{SL}^S$  (кривая 1) характеризует уменьшение свободной энергии системы за счёт процессов локализованных в межфазной области и  $\sigma_{SL}^S > 0$ . В неравновесных системах интенсивное уменьшение динамических значений межфазного натяжения  $\sigma_{SL}^d$  (кривые с минимумом на Рис. 2. 5) обусловлено необходимостью более глубокой перестройки химических связей в межфазной области и развитием процессов массопереноса через границу. При достижении на межфазной границе равновесных составов  $C_i(t_\Gamma) = C_i^P$  значения  $\sigma_{SL}^d$  становятся равными статическим значениям  $\sigma_{SL}^d(t_\Gamma) = \sigma_{SL}^S$ . Оценки показывают, что минимальные значения  $\sigma_{SL}^d$  при  $t_m$  достигаются при условии, когда химический состав фаз  $C_i(t)$  на межфазной границе достигает половины разницы концентраций  $C_i(\tau) - C_i^P$  и  $C_2^P - C_2(\tau)$ . Как показывают расчеты по модели [15] и экспериментальные данные применение импульсных и непрерывных (при сканировании по зоне пайки) лазерных источников, позволяет получать адгезионные паяные соединения без интерметаллидов с высокими механическими свойствами

### **Контактно-реактивная пайка**

Пайку, при которой припой образуется в результате контактного

плавления соединяемых металлов, промежуточных покрытий, прокладок или порошков, называют контактно-реактивной пайкой.

Контактное плавление, являющееся фазовым переходом первого рода (изменение термодинамического состояния сопровождается конечным тепловым эффектом и изменением структуры), наблюдается у материалов, образующих эвтектики или имеющих минимум на диаграмме плавкости. Процесс контактного плавления состоит из двух основных стадий:

1) подготовительной, заключающейся в образовании в зоне твердых растворов устойчивых зародышей жидкой фазы, их последующего диффузионного роста и слияния в тонкую пленку;

2) собственно контактного плавления - движения межфазных границ, определяемого чисто диффузионным механизмом.

Подготовительная стадия определяется в основном граничной кинетикой и включает в себя процессы взаимодействия в твердой фазе на активных центрах (образование химической, в частности металлической, связи) и последующий процесс взаимной диффузии в зоне мостиков схватывания. Таким образом, на отдельных локальных участках зоны контакта образуется диффузионная зона шириной  $X$ , подчиняющаяся законам граничной кинетики. Для построения технологического процесса необходимо определять кинетику перемещения межфазных границ (скорость процесса) и концентрационные поля в зоне контакта. Достаточно строгое математическое описание кинетики контактного плавления для нестационарного случая, рассмотрено в [19].

### ***Диффузионная пайка***

Пайку, при которой затвердевание расплава происходит при температуре выше температуры солидуса припоя без охлаждения из жидкого состояния, называют диффузионной пайкой. Процесс пайки начинается непосредственно после завершения процесса растворения ( $t = t_{\text{нас}}$ ) паяемых материалов в шве, т. е. достижения в шве состава  $C = C_2^P$  независимо от способа получения расплава в зазоре. Отвод легкоплавких компонентов из шва может осуществляться в результате взаимной диффузии в паяемые материалы, испарением в окружающую среду или связыванием их в тугоплавкие химические соединения.

Принципиально возможно сочетание всех трех механизмов. Наиболее изучен и используется первый механизм - отвод легкоплавких элементов за счет диффузии в паяемые материалы, который определяет скорость движения межфазных границ  $Y(t)$ .

Диффузионная пайка обеспечивает получение наиболее равновесной структуры шва, повышает температуру распайки, увеличивает пластичность, коррозионную стойкость и жаропрочность соединений за счет устранения в шве химической неоднородности, возникающей при кристаллизации.

Первая исследовательская работа в сборочно-монтажном производстве, направленная на повышение качества и надежности паяных соединений за счет оптимизации температурно-временных режимов пайки, была выполнена в нашей стране Жоржоллиани Б. Л. и Гладышевой Т. Р. в 1968 году. Ими была выявлена зависимость прочности паяных соединений, выполненных припоем ПОС-61 по меди с использованием канифольного флюса КТС, от температурно-временных режимов. Установлено, что при пайке меди припоем ПОС-61 образуются интерметаллические соединения, располагающиеся тонкими прослойками между медью и припоем и являющиеся соединяющей их фазой. Эти соединения обладают повышенной хрупкостью, поэтому разрушение происходит по слою интерметаллидов. Толщина и конфигурация интерметаллидных прослоек зависят от температуры и продолжительности взаимодействия жидкой и твердой фаз и скорости последующего охлаждения. При пайке меди оловянно-свинцовыми припоями образуются два вида интерметаллических соединений  $\eta$  - фаза состава  $Cu_6Sn_5$  и  $\epsilon$ -фаза состава  $Cu_3Sn$ . В паяном соединении главным образом образуются интерметаллиды  $\eta$  - фазы, так как  $\epsilon$  - фаза образуется при длительном (в течение нескольких минут) нагреве. Представлены также экспериментальные зависимости сопротивления разрушения паяных соединений от ширины диффузионных зон (рис. 2. 6) и определено, что максимальное значение прочности соединений  $3,8 \text{ кгс/мм}^2$  достигается, если ширина диффузионной зоны соответствует  $0,9\text{-}1,1 \text{ мкм}$ , при этом нагрев осуществляют в течение 6 сек. при температуре  $250 \pm 5^\circ\text{C}$ . Выводы радиоэлементов перед пайкой, как правило, подвергают горячему лужению для улучшения их паяемости. При этом в процессе лужения

уже начинает формироваться диффузионная зона, которая затем во время пайки продолжает расти. Поэтому при определении общей продолжительности процесса пайки рекомендуется учитывать и время предварительного лужения выводов припоем.

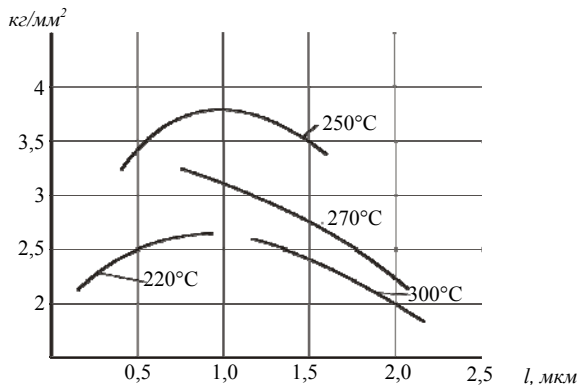


Рис. 2. 6. Зависимость усилий разрыва паяного соединения меди, выполненного припоем ПОС – 61, от ширины диффузионной зоны.

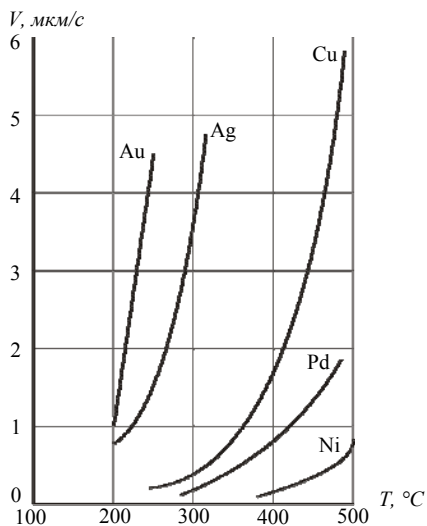


Рис. 2. 7 Зависимость скорости растворения металлов от температуры в припое ПОС-61.

Соблюдение указанных режимов пайки позволило в 2 раза снизить количество отказов паяных соединений.

Планарные выводы интегральных микросхем, как правило, имеют барьерное золотое покрытие толщиной 3-5 мкм, которое препятствует их окислению и способствует улучшению смачивания припоем. В процессе пайки золото, растворяясь в припое, образует с оловом интерметаллиды  $\text{AuSn}$ ,  $\text{AuSn}_2$ ,  $\text{AuSn}_4$ , которые снижают механическую прочность и электропроводность паяных соединений. В зависимости от температуры пайки, в интервале 200-250°C скорость растворения золота в припое ПОС-61 в 3÷10 раз превышает скорость растворения меди (Рис. 2. 7). Следует учитывать, что при быстром перемещении жидкого припоя относительно паяемого материала скорость растворения может превышать вышеуказанные значения в несколько раз. Из рис. 2. 7 видно, что в сравнении с другими металлами золото имеет самую высокую скорость растворения в припое ПОС-61. Поэтому во время пайки интерметаллидная прослойка золота начинает формироваться раньше и за время пайки ее образуется значительно больше, чем других интерметаллидов.

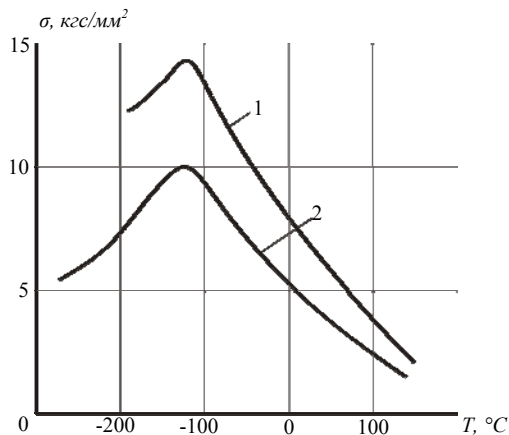


Рис. 2. 8. Зависимость свойств припоя ПОС-61 от температуры:  
1 — предел прочности на растяжение, 2 — предел прочности на сдвиг.

Выделение интерметаллидов происходит вдоль межфазных границ и носит диффузионный характер. Их влияние на прочностные свойства паяных соединений становится существенным при толщине прослойки более 1 мкм.

Толстые интерметаллидные прослойки имеют плохую физическую совместимость с припоем и паяемыми материалами. В процессе механических испытаний и при термоциклировании в паяных соединениях возникают значительные деформации, которые приводят к разрушению паяных соединений (рис. 2. 8). При этом разрушение происходит по интерметаллидным прослойкам. Для предотвращения образования интерметаллидов при монтаже позолоченных выводов электрорадиоэлементов рекомендуется пайку осуществлять по никелевому покрытию, которое в припое ПОС-61 практически не растворяется.

## **2. 3. Кристаллизация припоя в зазоре**

Как уже отмечалось, расплав припоя в шве формируется либо в процессе автономного плавления и последующего растворения в нем соединяемых материалов, либо в процессе контактного плавления. При охлаждении паяного соединения в результате затвердевания расплава, существовавшего при температуре пайки, формируется кристаллизационная зона паяного шва. В дальнейшем возможны фазовые превращения в твердом состоянии, однако первоначальная структура с присущими ей химической и физической неоднородностью оказывает значительное влияние на окончательную структуру и свойства этой зоны паяного шва. Припой ПОС-61 является эвтектическим сплавом, и поэтому после затвердевания он имеет многофазную структуру.

При охлаждении жидкого металла или сплава, начиная с определенной температуры, жидкое состояние становится термодинамически неустойчивым и металл переходит в твердое состояние, которому соответствует меньшее значение свободной энергии. Затвердевание жидкого металла происходит путем образования

центров кристаллизации и последующего роста кристаллов. Для начала кристаллизации необходимо переохлаждение расплава относительно равновесной температуры (температуры ликвидуса). Фактически кристаллизация начинается на межфазных границах, твердых частицах примесей и свидетельствует о гетерогенном образовании зародышей новой фазы. Скорость роста твердой фазы определяется интенсивностью отвода скрытой теплоты кристаллизации. Выделяющаяся скрытая теплота уменьшает степень переохлаждения жидкости у фронта кристаллизации. Поэтому для непрерывного роста твердой фазы необходимо отводить скрытую теплоту кристаллизации от межфазной границы. При пайке чаще всего она отводится через твердую фазу в направлении, противоположном росту кристаллов. Тепловым потоком в боковом направлении обычно можно пренебречь. Температура расплава повышается по мере удаления от межфазной границы. Такие температурные условия отвечают направленной кристаллизации металла.

Практически кристаллизация сплавов всегда протекает неравновесно. Признаком неравновесной кристаллизации является ликвационная неоднородность сплавов. Характер распределения элементов по сечению кристаллов и степень внутрикристаллитной ликвации для сплава определенного состава зависят от скорости кристаллизации, изменение которой обуславливает различную полноту прохождения диффузионных процессов в жидкой и твердой фазах. Кристаллизация сплава заканчивается при температуре затвердевания наиболее легкоплавкого компонента. Затвердевание эвтектики происходит при постоянной температуре и неизменном составе жидкой фазы, из которой образуются твердые растворы постоянного, но существенно различного состава. В ряде случаев припои эвтектического состава имеют в структуре кроме эвтектики избыточные крупные кристаллы обеих фаз. В эвтектической жидкости раздельно зарождаются и растут кристаллы обеих твердых фаз; в момент соприкосновения разноименных кристаллов начинается эвтектическое превращение, в процессе которого на фронте кристаллизации происходит сначала преимущественное выделение одной из фаз, а затем отложение другой. Первая фаза является ведущей, поскольку первой вырастает в жидкость,

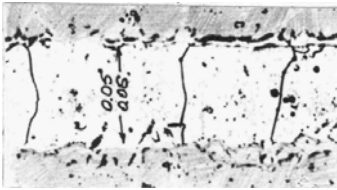
образуя скелет эвтектического зерна, в то время как вторая, ведомая фаза отлагается в междоузлиях скелета. Наличие избыточных кристаллов обеих фаз в сплаве эвтектического состава объясняется тем, что зародившиеся кристаллы успевают достаточно вырасти до столкновения друг с другом.

Реальные скорости охлаждения при затвердевании паяных швов превышают несколько сот градусов в минуту. В результате кристаллизация припоя в паяном шве происходит в неравновесных условиях, когда процессы выравнивающей диффузии в твердой и жидкой фазах оказываются, по крайней мере, частично подавленными. Это приводит к возникновению в кристаллизационной зоне шва ликвационной химической неоднородности, появлению неравновесных структурных составляющих, пористости и т. д.

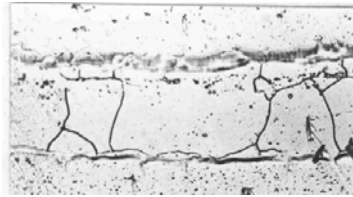
Составы первично кристаллизующегося твердого раствора близки к равновесному солидусу диаграммы состояния при соответствующих температурах. При весьма большой скорости охлаждения, при кристаллизации Pb-Sn расплава в шве наблюдается повышенное содержание свинца в твердом растворе.

Важнейшими факторами, определяющими зависимость прочности от зазора, являются особенности кристаллической структуры и химическая неоднородность в шве. Экспериментальные данные по кинетике кристаллизации позволяют заключить, что при зазорах менее  $a \leq a_{кр} \approx 80 \text{ мкм}$  в паяном шве наблюдается послойная направленная кристаллизация (рис. 2. 9. а,б,в). Шов имеет структуру твердых растворов, и появление кристаллов второй фазы наблюдается только при больших скоростях охлаждения, когда протекание ликвационных процессов затруднено. При зазорах  $a \geq a_{кр} \approx 0.1 \text{ мм}$  (рис. 2. 9. г) в центре шва наблюдается образование химической неоднородности (ликвация в зоне контакта двух рядов зерен). На рис. 2. 9 в представлена структура зарождения второго ряда зерен. При больших зазорах, более 0,5 мм, преобладает объемная кристаллизация припоя в шве, аналогичная кристаллизации в слитке с образованием новых фаз в процессе ликвации. Вне зависимости от величины зазора в галтельной

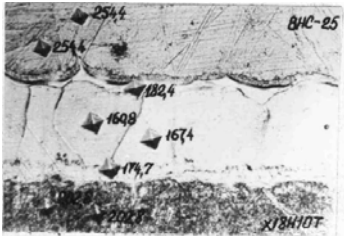
а)



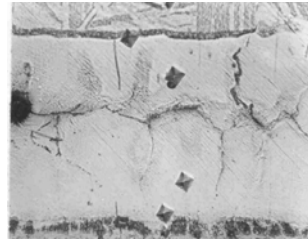
б)



в)



г)



д)



е)

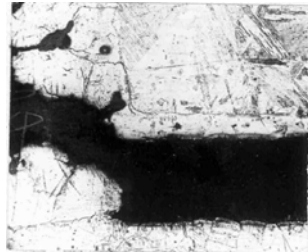


Рис. 2. 9 Микроструктура капиллярных и галтельных участков соединения.

Пайка припоем системы Cr-Ni-Mn ;  $T_{\text{п}}=1420 \text{ К.}$  , 30 мин;

Ширина шва: 50...65 мкм (а,б); 70...80 мкм ( в ) ; 90...120 мкм (г); галтель после гомогенизирующего отжига (д); характер разрушения соединения в области галтели при  $a \approx 0.1 \text{ мм}$  без отжига (е)

части шва кристаллизация сплава припоя обычно сопровождается образованием химической неоднородности в процессе ликвации. Наличие легкоплавкой эвтектике по границам зерен приводит к снижению коррозионной стойкости и механических свойств. Разрушение соединения начинается с зарождения трещин в этих зонах (рис. 2. 9е.). Гомогенизирующий отжиг  $T_{\text{отж}} < T_{\text{плавл}}$  наиболее легкоплавкой эвтектике сплава позволяющей за счёт диффузионных

процессов сформировать в галтели структуру твердых расплавов и существенно увеличить циклическую прочность и коррозионную стойкость соединения. Наиболее сильно ориентирующее влияние основного металла (эпитаксия) при кристаллизации проявляется в случае отсутствия на межфазной границе промежуточных слоев химических соединений.

Методами количественной металлографии и рентгеноспектральным анализом установлено, что в металлических системах с уменьшением зазора менее 0,1...0,2 мм наблюдается возрастание концентрации атомов твердой фазы над равновесными значениями (явление аномальной растворимости в малых зазорах). В зависимости от химического состава системы металл-расплав и величины зазора пересыщение может достигать 10...40 %.

При уменьшении зазора отсутствуют термодинамические факторы, изменяющие равновесие системы в направлении увеличения растворимости атомов твердой фазы в расплаве. Под аномальной «растворимостью» подразумевается фиксирование в зазоре после кристаллизации повышенного содержания атомов твердой фазы и, соответственно, пониженное содержание легкоплавкой составляющей сплава припоя.

На основании математического моделирования кинетики неравновесной направленной кристаллизации В. С. Новосадовым установлено, что повышенное (на 10...40 % выше равновесной концентрации) содержание в зазоре компонентов твердой фазы обусловлено кинетическими особенностями перераспределения легкоплавких компонентов перед движущимся фронтом кристаллизации. Перемещение последнего в соответствии с градиентом температуры в сторону противоположной межфазной границы приводит к обогащению закристаллизовавшейся части расплава тугоплавкими компонентами твердой фазы и увеличению легкоплавких компонентов в расплаве (зонная очистка). Наличие второй межфазной границы, дефектный поверхностный слой, которой является эффективным стоком для ликвидирующих легкоплавких элементов, а также замедление скорости движения фронта кристаллизации в результате концентрационного переохлаждения приводят к дополнительному увеличению концентрации компонентов твердой фазы в шве. С целью интенсификации процесса аномальной «растворимости» и увеличения прочностных и коррозионных свойств соединения необходимо уменьшать скорость кристаллизации и увеличивать диффузионную проницаемость

поверхностных слоев на межфазных границах, являющихся эффективными стоками для атомов ликвидирующих элементов.

Прочность паяных соединений находится в зависимости от ширины зазора и величины нахлестки. Зависимость прочности нахлесточных паяных соединений от величины зазора имеет вид кривой с максимумом. Уменьшение прочности при зазорах больших или меньших оптимального обусловлено повышением вероятности появления дефектов: непропаев при малых и усадочного происхождения при больших зазорах.

Величина оптимального зазора находится опытным путем и зависит от принятой технологии пайки: способов удаления окисных пленок, температурно-временных режимов и др. Для пайки планарных выводов ИМС на платы печатного монтажа оптимальными являются зазоры величиной  $0,05 \div 0,08$  мм.

Длину нахлестки выбирают равной двум-пяти толщинам наиболее тонкой из соединяемых деталей. Большая величина нахлестки нецелесообразна, поскольку нагрузка будет восприниматься в основном периферийными участками, а средняя часть окажется малонагруженной. При соединении разнородных материалов с большой площадью паяного соединения уровень термомеханических напряжений в последнем может превышать прочность более "слабого" элемента, поэтому, как правило, применяют припои с пределом текучести, меньшим предела прочности на растяжение этого "слабого" материала. Это особенно характерно для торцевых соединений диэлектрических подложек гибридных интегральных схем.

Кристаллизация жидкого металла в паяном шве происходит в условиях ориентирующего влияния основного металла. В литературе описаны многочисленные случаи, когда границы зерен металла кристаллизационной зоны продолжают границы зерен основного материала. Явление роста кристаллов, при котором кристаллическая решетка новой фазы закономерным образом ориентирована относительно кристаллической решетки исходной фазы, называется ориентированной кристаллизацией или эпитаксией. Особенно четко ориентированная кристаллизация в паяных швах проявляется, когда припой и паяемый металл имеют общую металлическую основу или разную основу, но одинаковый тип кристаллической решетки.

В работе для улучшения качества соединений, паяных олово-свинцовыми припоями, рекомендуется осуществлять ориентированную

кристаллизацию припоев на поверхности паяемого материала. Авторы считают, что это может значительно повысить плотность паяного шва и термостойкость паяных соединений.

Наиболее важными эксплуатационными характеристиками припоя в паяном шве, определяющими прочность, надежность и долговечность паяных соединений, являются предел прочности на растяжение, пластичность, вязкость, сопротивление срезу, сопротивление термической усталости. На рис. 3. 6 представлены зависимости некоторых свойств припоя ПОС-61 от температуры. При повышенных температурах (до  $+200^{\circ}\text{C}$ ) пределы прочности на растяжение и сдвиг припоев имеют низкие значения. При комнатных и низких температурах прочность повышается, достигая максимума ( $10\text{--}14 \text{ кгс/мм}^2$  при температуре от  $-100$  до  $+130^{\circ}\text{C}$ ). С дальнейшим понижением температуры прочность резко падает.

Основными путями повышения прочности литой структуры припоя в паяном шве являются:

- повышение дисперсности структуры припоя в шве;
- введения в припой стабильных дисперсных частиц тугоплавких материалов;
- создание композиционных припоев посредством армирования припоя более прочным металлическим каркасом.

Наиболее эффективными упрочнителями для олова могут служить высокодисперсные частицы собственного окисла, двуокиси титана или вольфрама, которые химически стабильны в контакте с оловянной матрицей дисперсно-упрочненного припоя. Предел прочности дисперсно-упрочненного сплава  $\text{Pb}+6\% \text{ PbO}$  при  $20^{\circ}\text{C}$  выше предела прочности чистого свинца в шесть раз. Прочность сплава  $\text{Pb}+6\% \text{ PbO}$  при  $200^{\circ}\text{C}$  равна прочности свинца при  $20^{\circ}\text{C}$ . Длительная прочность дисперсно-упрочненного свинца при температуре  $80^{\circ}\text{C}$  в пять раз выше, чем у чистого свинца. Однако, дисперсное упрочнение свинца частицами  $\text{PbO}$  заметно снижает пластичность сплава. Снижение пластичности припоев означает и снижение их вязкости.

Исследования влияния термоциклирования на механические свойства припоя ПОС-61 и модифицированного припоя ПОС-61 с мелкозернистой структурой показывают, что изменение дисперсности структуры припоя обеспечивают повышение сопротивления припоя усталостному разрушению.

Большая пластическая деформация паяного шва происходит в высокотемпературной части термического цикла (100-140°C). Образование усталостных трещин начинается на периферии паяного шва, т. е. в области галтели, вблизи границы раздела припоя с контактными площадками и выводами микросхем. Причем трещины развиваются в основном вдоль этой границы. Усталостные повреждения возникали на границах раздела фаз богатых оловом и свинцом.

Для повышения усталостной прочности припоя на основе олова предлагается армировать его отдельными частицами никеля или железа размером 40-100 мкм в количестве 5÷15 вес %.

В то же время известно, что эффективность упрочняющего действия частиц второй фазы, стабильных с металлической матрицей, определяется геометрическими параметрами структуры. При этом максимальный эффект достигается при выполнении следующих условий:

- размер упрочняющих частиц не должен превышать 0,01-0,05 мкм;
- среднее расстояние между упрочняющими частицами должно составлять 0,1-0,5 мкм при равномерном их распределении в матрице;
- количество упрочняющей фазы должно быть не более 5-10% (объемы).

Однако, добиться равномерного распределения в олово-свинцовой матрице ультратонких частиц упрочняющей фазы в процессе пайки практически невозможно, поэтому этот способ в практике пайки применяется редко.

## **2. 4. Старение оловянно-свинцовых припоев**

Появление интерметаллидов может иметь место и во время эксплуатации паяных соединений при обычных температурах в результате старения припоя. Под термином старение понимают структурные и фазовые изменения в паяных швах, которые происходят со временем и приводят к изменению механических и физико-химических свойств паяных соединений, хотя природа процессов, вызывающих эти изменения, может быть различной. Свойства паяных соединений зависят как от свойств основного металла, так и от свойств металла паяного шва (кристаллизационной, диффузионных зон, зон термического влияния). Процессы старения возможны в каждой из этих зон паяного

соединения и протекают они с различными скоростями. Причинами изменения первоначальных свойств паяных соединений могут быть процессы, происходящие в металлических материалах в твердом состоянии: распад пересыщенных твердых растворов, упорядочение, образование интерметаллидных фаз на границе раздела разнородных материалов вследствие реакционной диффузии и др. Пересыщенные твердые растворы образуются при быстром охлаждении таких сплавов, в которых растворимость в твердой фазе одного или нескольких компонентов уменьшается с понижением температуры. Пересыщенный твердый раствор термодинамически неустойчив и при соответствующих условиях с течением времени может распадаться с образованием многофазной системы, состоящей из обедненного твердого раствора и фазы выделения. Распад твердого раствора часто приводит к значительным изменениям свойств сплавов.

При исследовании старения припоя ПОС-61 в интервале температур 70...+ 150°C и длительности выдержки до 2500 ч, изменения в микроструктуре наблюдались лишь в ходе старения при относительно высоких температурах (более 50°C) и заключаются в коагуляции фаз эвтектики. Наиболее интенсивное снижение твердости происходит при повышенных температурах старения (50...150°C). Аналогично твердости изменяется прочность припоя. В течение первых 100 ч выдержки при указанных температурах усилие разрушения припоя ПОС-61 уменьшается от 7,9 до 5 кгс/мм<sup>3</sup>. Дальнейшее увеличение длительности старения практически не влияет на величину прочности припоя. При естественном (комнатная температура) и низкотемпературном старении твердость и прочность припоев изменяются значительно медленнее и не стабилизируются даже после 1000-часовой выдержки. Относительное удлинение припоя ПОС-61 после старения остается достаточно высоким не ниже 17%.

Кристаллизационная зона паяных швов, выполненных припоем ПОС-61, в исходном состоянии состоит из дендритов  $\beta$ -фазы (твердый раствор на основе свинца) на фоне эвтектики. Старение при 150°C приводит к распаду  $\beta$ -фазы с выделением твердого раствора на основе олова. Одновременно происходит сфероидизация  $\beta$ -фазы и коагуляция фазовых составляющих эвтектики. Скорость этих процессов тем выше, чем выше температура старения. В результате старения при 150°C в течение 2500 ч эвтектическая составляющая

сплава в кристаллизационной зоне полностью исчезает и структура состоит из чередующихся крупных участков  $\alpha$  и  $\beta$ -фаз.

Кроме отмеченных структурных изменений существенным при высокотемпературном старении является рост интерметаллидной прослойки, обусловленный прохождением реакционной диффузии между паяемыми металлами и припоем в твердом состоянии. Толщина прослойки интерметаллидов увеличивается с повышением температуры и длительности старения. Прочность соединений латуни и меди, паяных олово-свинцовыми припоями, после длительной выдержки при температуре до 170°C снижается. Как было установлено металлографическими исследованиями паяных швов, это снижение вызвано ростом слоя интерметаллида  $Cu_6Sn_5$  на границе раздела основной металл - припой.

Исследованиями паяных узлов радиоэлектронной техники при комнатной температуре в течение 1000 часов также установлено увеличение прослойки интерметаллического соединения олова с золотом, которая начинает оказывать влияние на снижение прочности паяных соединений при толщине более 1 мкм.

Таким образом, для снижения влияния процессов старения на надежность паяных соединений необходимо: добиваться подавления образования интерметаллидов в процессе пайки; избегать применения барьерных покрытий, обладающих высокой скоростью растворения в припое; не допускать применения припоя ПОС-61 в изделиях, эксплуатируемых при температурах выше 60°C.

## **2. 5. Дефекты паяных соединений**

При использовании групповых методов пайки удается в большей мере автоматизировать управление процессом по главным параметрам технологического режима пайки, т. е. обеспечивать температурные и временные характеристики процесса: температуру припоя и ПП, длительность выдержки при пайке, скорость и направление движения ПП и припоя, скорость нагрева и охлаждения паяного шва. Визуальный осмотр в этом случае дает информацию лишь о последствиях прошедшего процесса пайки.

Основными критериями качества паяных соединений при визуальном

контроле являются:

1. Хорошо сформованный паяный шов с полномерными галтелями вместе соединений является признаком хорошего качества пайки. При этом важно, чтобы пайка была скелетной и были ясно видны контуры соединяемых поверхностей. Излишек припоя не улучшает электропроводности и прочности паяемых соединений. Количество припоя, участвующего в образовании паяного соединения, не должно превышать количество, необходимое для полного проплавления шва.

2. Поверхности соединений должны хорошо смачиваться припоем, однако образованный избытком припоя большой наплыв еще не характеризует истинных условий смачивания. Если смачивание поверхности недостаточно припой скатывается с основного металла, оставляя на нем тонкие паутинки или капельки. Труднее выявить недостаточную смачиваемость поверхности выводов элементов, установленных на плате

3. Осмотр геометрической конфигурации каждого паяного соединения позволяет к тому же проверить правильность установки выводов элементов, их длину, выявить непропаи, увидеть мостики припоя в изолированных зазорах, образующие ложные соединения на плате.

4. Оценка чистоты поверхности паяного соединения определяет возможность коррозии, если места паяк и окружающая их зона имеют характерные признаки загрязнений коррозионно-активными компонентами процесса пайки.

Причины возникновения дефектов столь разнообразны, что выделить какие-либо четкие зависимости часто не представляется возможным. Тем не менее, существует ряд типичных дефектов, вызванных несовершенством конструкции ПП, нарушением технологического процесса, изменением химического состава материалов.

**Непропай.** Этот дефект возникает в результате полного или частичного незаполнения зазора жидким припоем вследствие плохого смачивания паяемых поверхностей флюсом или припоем, из-за недостаточного количества жидкого припоя или вытекания его из слишком широкого зазора, при нарушении режимов нагрева. Непропаи снижают механические свойства паяных соединений, их коррозионную стойкость, электро- и теплопроводность.

**Перемычки** образуются главным образом из-за неправильного

конструктивного оформления рисунка ПП. Этот дефект может быть исправлен применением специальных средств, влияющих на физические характеристики расплава, например, применением активированных флюсов. Возникновение перемычек может быть также обусловлено технологическими причинами, при поиске которых необходимо обратить внимание на температуру припоя, температуру предварительного подогрева ПП, скорость конвейера, качество флюсования, загрязнение припоя.

**Сосульки** - самый распространенный дефект при пайке ПП волной припоя. Причины его образования заключаются чаще всего в низкой температуре и недостаточном времени пайки. В этом случае сосульки легко устраняются повышением температуры, либо снижением скорости конвейера. Образованию сосулук способствует недостаточное количество флюса, неравномерность флюсования, слишком большое или слишком малое погружение плат в волну.

**Холодная пайка** - дефект, образующийся при перемещении вывода детали или движении самого припоя во время его кристаллизации в паяном узле. Он характеризуется неровными контурами и наличием в соединениях небольших трещин и складок. Под холодной пайкой, как правило, понимают отсутствие сплавления, по крайней мере, с одной из спаиваемых поверхностей. Этот дефект можно исправить только вторичной пайкой соединения. Наиболее опасная причина холодной пайки - несмачиваемость поверхностей. Такой дефект с трудом поддается исправлению и только лишь с использованием активированных флюсов, требующих тщательной отмывки.

**Заливная пайка** не ухудшает электрического соединения, но затрудняет визуальный контроль и существенно увеличивает расход припоя. Чтобы его уменьшить, целесообразно повысить температуру пайки или увеличить ее продолжительность. Иногда увеличение расхода припоя связано с неправильно выбранным углом соприкосновения платы со струей припоя в процессе волновой пайки. К снижению расхода припоя приводит также повышение плотности флюса. В частности, применение канифольных флюсов повышенной плотности может ликвидировать указанный дефект.

В отличие от скелетной пайки, хорошо поддающейся визуальному контролю, заливная пайка обладает лучшей укрывистостью лаковыми покрытиями.

**Налипание припоя** происходит, если материалы диэлектрического основания или паяльной маски не совместимы с растворителем флюса или не обладают достаточной нагревостойкостью. Тогда поверхность диэлектрика размягчается, становится липкой и задерживает на себе припой и его шлаки. Другая причина налипания припоя - недостаточное количество нанесенного на ПП флюса. Такой дефект легко устраняется при повторной пайке после обильного смачивания поверхности платы флюсом. Трещины связаны с различием в температурных коэффициентах линейного расширения припоя, металлизации отверстий, основания ПП, печатных проводников и выводов элементов. Термомеханические напряжения в паяном узле могут возникать также в результате больших температурных градиентов при резком нагреве и охлаждении ПП в процессе групповой пайки, когда нагреву подвергается вся плата. Следует иметь в виду также наличие явлений релаксации напряжений в диэлектриках ПП, состоящих в различной реакции на нагрузку в зависимости от скорости погружения. Поэтому для предотвращения образования трещин необходимо всеми средствами смягчать термоудар на ПП в процессе пайки: строго выдерживать температурные режимы нагрева и охлаждения ПП, не вынимать платы из транспортных рамок или снимать с выпрямляющих приспособлений до полного остывания.

**Раковины и поры** - дефекты, связанные с состоянием и свойствами материала основания ПП. Появление таких дефектов обусловлено выделением газообразных продуктов из основания в зону пайки. Источниками газовыделений, как правило, являются пары растворителя флюса, продукты разложения флюса, конденсационная влага, низкомолекулярные компоненты связующего диэлектрика ПП. Поэтому в процессе производства ПП, печатных узлов и блоков необходимо принимать меры по ограничению насыщения их влагой, а перед процессом сборки и пайки обязательно тщательно сушить предпочтительно с использованием процессов термовакuumной сушки. Следует также иметь в виду, что чем выше температура и время пайки, тем продолжительнее припой будет находиться в жидком состоянии, и тем больше вероятность, что газы успеют выйти из расплава, не препятствуя качественному оформлению соединения.

**Шарики и брызги припоя** - опасный дефект пайки, состоящий в бурном кипении пасты и в налипании на поверхность ПП продуктов кипения.

Плохо прилипшие шарики припоя, отделившись от поверхности, свободно перекатываются по поверхности ПП, накапливаются в пазах и промежутках между элементами, в неопределенный момент могут вызвать короткие замыкания. Результаты электрического контроля ПП с такими дефектами недостоверны, так как не позволяют локализовать местоположение дефектов. Наиболее распространенной причиной дефекта является неудовлетворительное удаление влаги из ПП вне зависимости от источника ее возникновения. Вместе с этим образование шариков и брызг припоя может быть связано с недостаточной сушкой ПП после расконсервации, неудовлетворительной работой системы предварительного подогрева ПП или тем, что элементы системы предварительного подогрева не успели нагреться или вообще не включились.

Таким образом, дефекты, возникающие в паяных соединениях, как правило, свидетельствуют или о нарушении режимов пайки, или о несоблюдении технологии подготовки компонентов под пайку. В результате автоматизации сборочно-монтажной пайки повышается точность дозирования припоя и флюса, а также стабильность температурно-временных режимов пайки. Однако, очевидно, что для достижения высокого качества и надежности паяных соединений требуется тщательно соблюдать не только режимы пайки, но и требования по подготовке изделий под пайку, контролировать паяемость покрытий на выводах электрорадиоэлементов и фольгированных проводниках печатных плат, а также пригодность припоя и флюса для пайки.

## ***2. 6. Технологические особенности автоматизированных способов сборочно-монтажной пайки***

Выбор конкретного способа пайки зависит от конструктивных особенностей монтажных плат и применяемых электрорадиоэлементов, а также от объемов производства аппаратуры, и требуемой производительности процесса пайки. В эпоху ламповой радиоэлектроники в 20-40-х годах прошлого века аппаратуру изготавливали с применением технологии объемного проводного монтажа, выполняемого пайкой ручными паяльниками. Иногда вместо пайки применяли технологию скручивания проводов с последующим их оплавлением электрической дугой. В начале 50-х годов, когда появились электронные компоненты второго поколения - транзисторы, монтируемые в

отверстиях на печатных платах, возникла необходимость в создании высокопроизводительной промышленной технологии пайки. С внедрения концепции волновой пайки началась разработка механизмов, позволяющих работать с печатными платами очень сложных электронных устройств. С появлением микросхем надежность аппаратуры возросла, а габариты уменьшились. Это способствовало дальнейшему расширению функциональных возможностей радиоэлектронной аппаратуры. Дальнейшее развитие модулей на печатных платах потребовало изыскать резервы для повышения плотности монтажа. При этом стало очевидным, что монтаж выводов радиоэлементов в сквозные отверстия приводит к неэффективному использованию поверхностей печатной платы. В это время начинает развиваться концепция двухстороннего монтажа, которая предусматривает установку компонентов с обеих сторон печатной платы. Для этого потребовалось выводы формировать "в планар" (рис. 1. 2), т. е. параллельно поверхности печатной платы, а фиксацию компонентов на плате осуществлять приклеивкой.

Теперь возникло новое противоречие - хорошо зарекомендовавшая себя технология волновой пайки в данном случае не годилась из-за того, что паяемые соединения располагаются с той же стороны, что и корпус микросхемы и для осуществления пайки волной припой корпусов микросхем приходилось погружать в расплавленный припой, что приводило их к перегреву и выходу из строя. Это противоречие возможно было разрешить за счет изготовления корпусов микросхем из термостойких диэлектрических материалов, либо, каким-то образом защищая их от перегрева, что требует применения специальной оснастки. В настоящее время за рубежом применяются современные волновые установки с микропроцессорным управлением и устройствами, создающими волну припоя специальной формы, что обеспечивает возможность пайки электрорадиоэлементов не только с традиционными выводами, но также и безвыводных компонентов, монтируемых на поверхности. В зарубежных публикациях такие компоненты называют SMD - устройства (что означает - монтируемые на поверхности устройства), а технологию SMD - технологией.

В конце 60-х годов за рубежом стали развиваться новые, так называемые "Reflow", автоматизированные методы пайки. В отечественной специальной литературе этот термин переводится как пайка обратным потоком (имеется в

виду противоположность процессу волновой пайки) или пайка расплавлением дозированного припоя (РДП-пайка). Пайка обратным потоком предусматривает следующую последовательность выполнения операций. Припой наносят на печатную плату до установки элементов одним из способов: избыточным лужением, гальваническим наращиванием, применяя фасонный припой или припойную пасту, которая содержит в себе порошок припоя и флюсующую связку. После этого на плату устанавливают и приклеивают электроэлементы, флюсуют места пайки (если это необходимо) и плату подвергают тепловому воздействию, в результате которого припой оплавляется и образуются паяные соединения. Известны следующие способы РДП-пайки:

- контактная пайка групповыми паяльниками;
- в жидком теплоносителе;
- в паровой фазе (конденсационная пайка);
- горячим воздухом;
- резистивный нагрев проходящим электрическим током (пайка параллельными электродами);
- инфракрасным излучением;
- лазерным излучением.

Это основные способы пайки, которые в 60-90-х годах были реализованы в автоматизированном сборочно-монтажном оборудовании за рубежом и в нашей стране. Разработка новых технологических процессов осуществлялась в связи с необходимостью создания автоматизированного оборудования для производства аппаратуры по планарной технологии или с применением безвыводных компонентов, монтируемых на поверхности печатной платы. При этом в качестве диэлектрической основы для печатных плат применяют стеклотекстолит, тефлон-текстолит, полиамид или керамику.

Рассматриваемые способы пайки отличаются друг от друга источниками тепла и способом доставки тепловой энергии в зону пайки. В табл. 1. 4 сведены основные технологические характеристики рассматриваемых способов пайки. Из таблицы видно, что все они делятся на две группы - это способы пайки, обеспечивающие общий нагрев всего паяемого модуля, и способы пайки, обеспечивающие локальный нагрев только паяемых соединений. Очевидно, что общий нагрев требует более длительного теплового воздействия, так как требуется довести до температуры пайки весь паяемый модуль. Следует

отметить, что к достоинствам способов пайки с общим нагревом относится высокая производительность процесса формирования паяных соединений. Недостатком является необходимость применения термостойких компонентов, образование термомеханических напряжений в конструкции печатного модуля при остывании, формирование крупнозернистой структуры паяных соединений с образованием интерметаллидных прослоек, что приводит к снижению надежности паяных соединений. Основным недостатком локальных способов нагрева является значительно меньшая производительность процесса пайки, так как паяные соединения формируются последовательно.

Таблица 1. 4. Сравнение различных способов пайки.

| №<br>пп | Способ пайки                       | Вид нагрева | Температура<br>пайки,<br>Т°, С | Время пайки,<br>t, с |
|---------|------------------------------------|-------------|--------------------------------|----------------------|
| 1       | Волной припоя                      | Общий       | 220 - 265                      | 1,2 - 2,5            |
| 2       | В жидком теплоносителе             | Общий       | 250 - 260                      | 15 - 20              |
| 3       | Конденсационная                    | Общий       | 215                            | 40 - 90              |
| 4       | В камере с нагретым газом          | Общий       | 250 - 300                      | 20 - 40              |
| 5       | Струей горячего пара               | Локальный   | 300 - 400                      | 2 - 5                |
| 6       | Групповым паяльником               | Локальный   | 320 - 340                      | 0,8 – 1,0            |
| 7       | Параллельными электродами          | Локальный   | 220 - 250                      | 0,3 – 0,5            |
| 8       | В инфракрасной<br>конвейерной печи | Общий       | 205 - 210                      | 15 - 20              |
| 9       | Сфокусированным<br>ИК - излучением | Локальный   | 220 - 250                      | 0,3 - 0,8            |
| 10      | Лазерная непрерывная               | Локальный   | 220 - 250                      | 0,3 – 0,5            |
| 11      | Лазерная импульсная                | Локальный   | 250 - 300                      | 0,02 - 0,08          |

Следует отметить, что температурный интервал пайки при использовании припоя ПОС-61 лежит в пределах 200-250°С. Однако, этот интервал уменьшается в случае длительного общего нагрева при использовании теплопроводящих сред, обладающих высоким коэффициентом теплопроводности (конденсационная пайка). И наоборот, увеличивается при

сокращении времени пайки, сокращении зоны теплового воздействия и снижении теплопроводности среды (пайка струёй горячего пара).

Характерной особенностью локальных способов пайки является повышение прочностных свойств паяных соединений. Среди них наибольший интерес представляет лазерная пайка.

Импульсные твердотельные лазеры впервые в промышленности стали применять с 1974 года в процессах сверления, резания, сварки различных материалов. Применению лазера в качестве теплового источника в системах пайки, предшествовали создание паяльных паст, содержащих в себе флюс и припой, разработка технологии их дозирования с помощью дозаторов, и создание микропроцессорных систем управления, позволивших точно позиционировать изделия под лазерным лучом с помощью двухкоординатных столов и управлять выходной энергией лазерного излучения, что в конечном итоге сделало возможным автоматизацию процесса лазерной пайки.

Первая коммерческая лазерная установка пайки с числовым программным управлением в Америке появилась в 1976 году с использованием  $\text{CO}_2$ -газового лазера мощностью 50 Вт, а затем в 1982 году с использованием непрерывного твердотельного лазера на иттрий-алюминиевом гранате. Первая отечественная работа, посвященная исследованиям процесса пайки электроэлементов на печатные платы лазером непрерывного излучения, была опубликована в 1980 году, а в 1983 году электронной промышленностью был изготовлен опытный образец автоматизированной лазерной установки "Квант-50-01", предназначенной для пайки планарных выводов ИМС с применением проволоочного припоя, предварительно напрессовываемого на выводы. Однако, данная технология не получила широкого распространения из-за большой трудоемкости ручных работ по напрессовке припоя, сборке микросхем на печатной плате.

В 1981-1983 годах, творческим коллективом при непосредственном участии автора данной работы, были выполнены научные исследования процесса лазерной пайки с применением паяльных паст. В результате исследований совместно с ИЭС Е. О. Патона АН УССР была разработана новая паяльная паста, защищенная авторским свидетельством, а также разработан технологический процесс лазерной пайки, который затем был воплощен в промышленных установках "ПЛП-2-М" и "АСЛП", выпускавшихся

судостроительной промышленностью. Помимо названного оборудования известны также установки "Аракс-5" и "СКЦИ".

Лазерная пайка имеет ряд отличительных особенностей в сравнении с рассмотренными способами пайки. Лазерное излучение может быть сфокусировано в пятно диаметром около 0,1 мм, что в сочетании с высокой плотностью мощности излучения обеспечивает возможность пайки электронных компонентов, не допуская их перегрева и деформации печатных плат. Именно поэтому лазерная пайка является единственным способом, обеспечивающим возможность пайки электроэлементов, монтируемых на платах, наклеенных на металлические теплостоки для рассеивания тепла, выделяемого микросхемами при их функционировании.

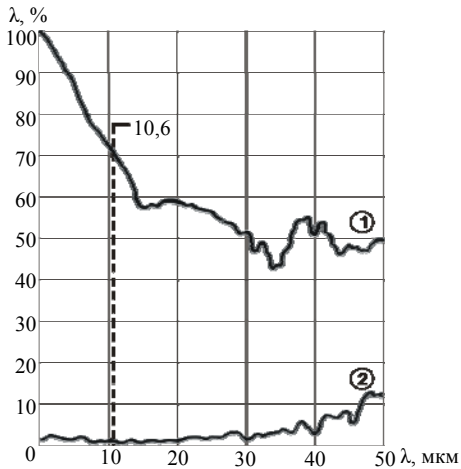
Лазерная пайка является бесконтактным процессом. Это исключает внесение загрязнений в паяное соединение, что имеет место при использовании контактных способов пайки. Паяные соединения, выполненные лазерной пайкой, имеют глянцевую поверхность, хорошо сформированные галтели, отличаются повышенными прочностными свойствами. Возможность гибкого регулирования и точного дозирования подводимой энергии позволяет варьировать температуру и время пайки в широких пределах. Указанные особенности предопределили возможность создания лазерного паяльного оборудования, сочетающего в себе автоматизированную пайку с автоматизированным контролем качества паяных соединений. Инфракрасное излучение в данном случае является и источником тепла и носителем информации о кинетике охлаждения паяного соединения, по которой оценивают качество пайки.

Еще одной особенностью непрерывной пайки твердотельными лазерами является отсутствие возгорания диэлектрической основы печатных плат, что имеет место в процессе пайки сфокусированным ИК-излучением и  $\text{CO}_2$ -лазером. Это объясняется различиями спектральных оптических характеристик нагреваемых материалов. В спектральном диапазоне излучения  $\text{CO}_2$ -лазера ( $\lambda=10,6$  мкм) припой обладает более высоким коэффициентом отражения, чем диэлектрические материалы (рис. 2. 10), которые нагреваются при этом сильнее и начинают обугливаться раньше, чем припой достигнет плавления. В процессе пайки твердотельным лазером ( $\lambda=1,06$  мкм) результат – противоположный (рис. 2. 11). Коэффициент отражения для диэлектрической основы печатных плат

больше. Поэтому припой нагревается быстрее и достигает плавления раньше, чем начнется возгорание диэлектрической основы платы.

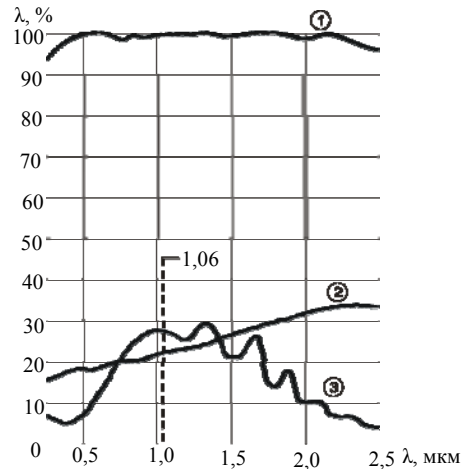
По сравнению с твердотельными лазерами  $\text{CO}_2$ -лазеры имеют в 10 раз более высокий КПД и поэтому более экономичны и стоят значительно дешевле. С учетом вышеизложенных особенностей  $\text{CO}_2$ -лазеры чаще применяют для импульсной пайки, при выполнении которой излучение лазера фокусируют в пятно меньших размеров, чем ширина паяемых выводов ИМС. В результате этого предотвращается возгорание диэлектрической основы платы. Однако, для выполнения этого условия требуется очень высокая точность позиционирования выводов под лазерным лучом.

Лазерная пайка (рис. 2. 12а) выполняется в такой же последовательности, как и процессы пайки нагретым газом, ИК-излучением, конденсационной пайки.



$\text{CO}_2$  - лазер

Рис. 2. 10. Отражение лазерного излучения от прямых поверхностей: 1 – диффузное отражение от припоя, 2 – диффузное отражение от диэлектрической основы.



Твердотельный лазер

Рис. 2. 11. Отражение лазерного излучения от прямых поверхностей: 1 – диффузное отражение от припоя, 2 – отражение от припоя, 3 – диффузное отражение от диэлектрической основы.

На выводы ИМС предварительно наносят паяльную пасту и затем ее подвергают оплавлению лазерным излучением. В установке АСЛП реализовано выполнение целого ряда операций в едином цикле в автоматизированном режиме. По заданной программе осуществляется выбор микросхемы из накопителя, дозирование клея, совмещение выводов ИМС с контактными площадками печатной платы, дозирование паяльной пасты на выводы и оплавление ее лазерным излучением.

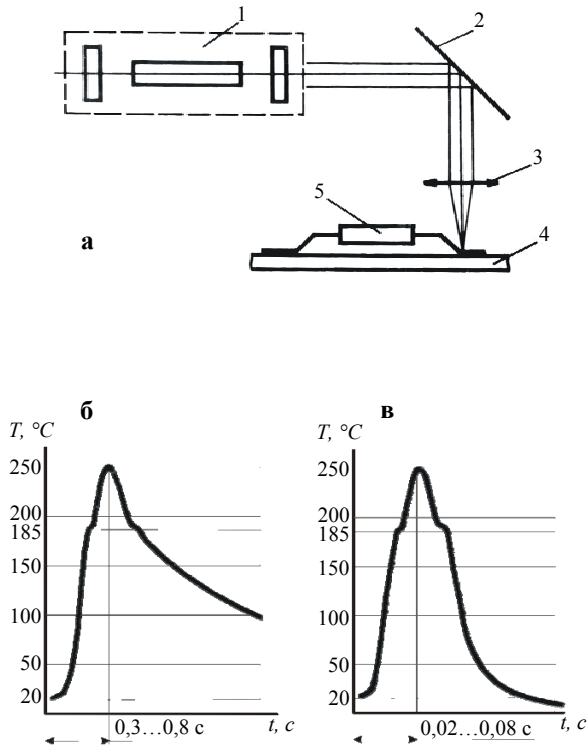


Рис. 2. 12. а – схема лазерной пайки: 1-излучатель, 2-поворотное зеркало, 3-объектив, 4-печатная плата 5-микросхема  
б – температурный профиль лазерной непрерывной пайки,  
в – температурный профиль лазерной импульсной пайки.

Характерный температурный профиль лазерной непрерывной пайки представлен на рис. 2. 12-б. Время пайки составляет 0,3-0,8сек. Для сравнения на рис. 3. 9-в представлен температурный профиль импульсной лазерной пайки.

Время пайки в этом случае еще меньше, чем при непрерывной лазерной пайке и составляет 0,02-0,08 сек. Из рис. 3. 9-в также видно, что скорость охлаждения при импульсной пайке значительно выше, чем при непрерывной.

Таким образом, режимы импульсной пайки более других приближаются к идеальному режиму пайки.

Припой мгновенно оплавляется, смачивая паяемые поверхности, затекая в зазор, и мгновенно остывает, что способствует образованию прочной мелкодисперсной кристаллической структуры. Однако, существует ряд технологических, технических и экономических проблем, сдерживающих широкое использование в промышленности импульсной лазерной пайки.

Требуются новые флюсы и способы их дозирования, т. к. традиционные паяльные пасты, содержащие в себе флюсующую связку и порошок припоя, уже не согласуются с режимами импульсной пайки. Происходит вскипание флюса и разбрызгивание припоя, что препятствует получению качественных паяных соединений. При сокращении времени пайки требуется еще более высокая химическая активность флюсов, для того, чтобы обеспечить смачивание припоем паяемых поверхностей и заполнение зазора. А это в свою очередь увеличивает опасность коррозии плат.

В настоящее время предпринимаются попытки заменить жидкие флюсы газообразными. Для этого паяемый узел требуется поместить в камеру, заполненную газом  $\text{CH}_3\text{Br}$  при давлении 10 мм. рт. ст., а это резко усложняет оборудование и сокращает производительность процесса пайки.

Известен эффект увеличения активности поверхностей при импульсном лазерном воздействии. В связи с этим проводятся исследования, направленные на разработку бесфлюсовой импульсной пайки с применением модуляции добротности лазерного излучения. Таким образом, импульсная лазерная пайка на сегодняшний день является лабораторным процессом, но очевидно, что в ближайшее время на рынке появится и это оборудование.

Основным недостатком импульсной лазерной пайки и в целом лазерной пайки, является высокая стоимость оборудования. Тем не менее, имеются зарубежные публикации, в которых отмечается, что в производстве военной

техники, когда требуется высокая надежность паяных соединений, например, в приборах инерциального наведения ракет "MX" и "Peace Keeper" (фирма Rockwell Internat.) успешно применяется и непрерывная и импульсная лазерная пайка.

Обобщая анализ технологических особенностей современных способов пайки, следует отметить следующие закономерности: развитие методов пайки идет в направлении повышения надежности паяных соединений при одновременном повышении производительности процесса пайки, при этом наблюдается сокращение времени пайки (табл. 1. 4). Эти две тенденции находятся в постоянном противоречии. Так способы пайки с общим нагревом отличаются более высокой производительностью, но меньшей надежностью паяных соединений в сравнении с локальными способами нагрева. Из приведенных в табл. 1. 4 способов пайки лазерный отличается минимальным временем нагрева и соответствует значениям 0,3-0,5 сек. для непрерывного и 0,02-0,08 - для импульсного режима. Время пайки параллельными электродами сопоставимо с лазерной непрерывной пайкой и составляет 0,3-0,5 сек.

Как будет показано в главе 3, с точки зрения повышения надежности паяных соединений, идеальный процесс пайки предусматривает предельное сокращение времени контактирования жидкой фазы припоя и паяемого вывода ИМС при условии обеспечения качественного смачивания паяемых поверхностей припоем. Для этого требуются высокоактивные флюсы, которые в то же время не должны вызывать коррозию паяемых материалов.

Противоречие между производительностью процесса пайки и получаемой надежностью паяных соединений удастся разрешить в результате перехода от контактных способов нагрева к бесконтактным. При этом наблюдается закономерный переход в использовании энергопроводящей среды от твердого тела (жало паяльника) к жидкости (пайка в теплоносителе), затем к использованию паров жидкостей (конденсационная пайка), газов (пайка нагретым газом) и электромагнитных полей (пайка инфракрасным и лазерным излучением). В работе отмечается, что это связано с необходимостью увеличения теплопроводности сред, которая возрастает в такой же последовательности. Это в конечном итоге и способствует сокращению времени нагрева (табл. 1. 4).

Таким образом, наиболее перспективным способом автоматизированной пайки является лазерная пайка. Производительность лазерной пайки в настоящее время уже достигает двух тысяч паек в час. Дальнейшее увеличение производительности лазерной пайки возможно за счет раздвоения лазерного луча или в результате применения голографических фильтров. В этом случае лазерное излучение возможно фокусировать одновременно на всех паяных соединениях, относящихся к одной микросхеме или на всей печатной плате, если использовать лазеры большой мощности.

Рассматривая способы дозирования припоя и флюса в процессах пайки расплавлением дозированного припоя, следует отметить, что в последнее время предпочтение отдают применению паяльных паст, которые содержат в себе и флюс и припой, и позволяют автоматизировать процесс дозирования в результате трафаретной печати, либо дозирования пневмодозаторами.

## ***2. 7. Припойные материалы и их дозирование.***

Повышение плотности монтажа на поверхности печатных плат требует применения специализированных припойных материалов и флюсов для автоматизации сборочных процессов и обеспечения высокой надежности паяных соединений. Как было показано при анализе технологических особенностей современных способов пайки, низкотемпературные припои чаще всего применяются в виде паст. Это объясняется тем, что паяльные пасты обладают рядом положительных свойств: возможность совмещения операций дозирования и припоя и флюса, возможностью получения микродоз, снижением расхода припоя, возможностью автоматизации процесса дозирования припоя и флюса.

Впервые паяльные пасты начали применять в 60-х годах в микроэлектронике при изготовлении толстопленочных гибридных интегральных схем (ГИС) на керамических подложках. В конце 70-х годов, когда за рубежом получил распространение монтаж компонентов на поверхности печатных плат, аналогично технологии изготовления ГИС, припойные материалы и способы их дозирования были перенесены на печатные платы. Однако, существовавшие тогда паяльные пасты для новых способов пайки уже не годились в силу их специфических особенностей, поэтому

потребовалось разрабатывать новые припойные материалы.

Важнейшим структурным компонентом, определяющим состав паяльной пасты, является металлическая фаза - порошок припоя. В зависимости от способа получения, металлические гранулы могут иметь различную форму, размеры и гранулометрический состав. Известны и широко применяются способы получения порошка распылением расплавленного припоя в среде защитных газов, ультразвуковым диспергированием расплавленного припоя также в защитной среде и эмульгированием расплавленного припоя в кремний-органической жидкости.

Паяльная паста представляет собой суспензию порошка припоя в среде, содержащей флюс. Паяльные пасты могут быть эффективно использованы для соединения практически всех паяемых материалов, включая медь, олово, серебро, золото, палладий, платина, ковар, сталь и композиций из этих материалов. Такая технологическая многосторонность обусловлена сложностью состава паст и соответствующим подбором компонентов, что позволяет регулировать такие свойства, как состав припоя, морфология и распределение частиц порошка припоя по размерам, тип флюса и его активность, концентрацию компонентов, вязкость паст.

Учитывая тенденцию к повышению плотности монтажа, паяльные пасты должны удовлетворять следующим требованиям:

- обладать структурной однородностью;
- обладать необходимыми адгезионными свойствами;
- обеспечивать химическое сродство расплавленного припоя к паяемым поверхностям;
- не разбрызгиваться при нагреве;
- не образовывать шариков припоя;
- обладать стабильными реологическими свойствами;
- сохранять свои свойства при хранении;
- обладать необходимой способностью к отмывке;
- обладать минимальной коррозионной активностью.

На основе ряда контролируемых параметров и характеристик компоненты припойных паст могут быть точно подобраны для обеспечения качественных паяных соединений путем определения метода дозирования паст, необходимой точности совмещения паяемых компонентов и узлов, метода подвода энергии

для пайки и требований последующей очистки. Таким образом, основой успешного применения паст является тщательный учет технологических факторов процесса пайки и рациональный выбор пасты. На рис. 3. 10 представлены основные свойства паяльных паст и влияние отдельных компонентов связки на их технологические свойства. Связка включает в себя флюс, активатор, растворитель, пластификатор и поверхностно-активные вещества (ПАВ) или антиоксидант.

|                                       |                                   |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| припойная паста                       | порошок припоя                    | 0...50 мкм          |   |   | + | + | + |   |   |   |   |   |   |   |   | + |   |   |
|                                       |                                   | 50...100            |   |   | + | + | + |   |   |   |   |   |   |   |   | + |   |   |
|                                       | флюс                              |                     | + | + | + |   |   | + | + | + | + |   |   | + | + | + | + | + |
|                                       | активатор                         |                     | + | + | + |   |   | + | + |   |   |   |   | + | + | + | + | + |
|                                       | растворитель                      |                     |   |   |   | ± | ± | + | + | + | + | + | + |   | + | ± |   | ± |
|                                       | пластификатор                     |                     |   |   |   | ± | ± | ± | ± | ± |   |   |   |   |   |   |   | + |
|                                       | пав, антиоксидант                 |                     |   |   |   |   |   | + | + | + |   |   |   | + | ± |   | + | + |
| характеристика свойств припойных паст | активность флюса                  |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                       | коррозия                          |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                       | фактор растекания                 |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                       | реология                          | вязкость            |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                       |                                   | дозировуемость      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                       | адгезия пасты к поверхности       |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                       | связка                            | гидрофильная        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                       |                                   | гидрофобная         |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                       |                                   | невысыхающая        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                       |                                   | медленно высыхающая |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                       |                                   | быстро высыхающая   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                       | жизнеспособность паст             | в упаковке          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                       |                                   | на воздухе          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                       | температурный интервал пайки      |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                       | скорость нагрева при пайке        |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                       | способ отмывки связки после пайки |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

Рис. 3. 10. Влияние компонентов припойных паст на их технологические свойства  
 Пластификатор является веществом, образующим с остальными компонентами

связки гель, способный обеспечить механическую устойчивость суспензии порошка припоя в пасте. ПАВ или антиоксидант препятствует окислению частиц порошка припоя и химическому распаду связки при хранении паст.

Следует отметить, что количество компонентов в связке может быть менее пяти. Нередко один из компонентов в составе флюсующей связки может выполнять функции и активатора и растворителя, активатора и антиоксиданта и т. п.

**Флюсом** в составе связки может быть любое совместимое с другими компонентами вещество, основным назначением которого является очистка поверхности металла по принципу последовательного замещения от окисла к чистому металлу. Таким образом, флюс обеспечивает среду для перехода ионов металла от припоя к твердому металлу и наоборот. При этом флюс не должен образовывать нерастворимых соединений, как на поверхности гранул припоя, так и на плате. Ибо образование нерастворимых соединений на поверхности гранул приводит к ухудшению растворимости, появлению шариков припоя на границах паяных соединений. Активность флюса должна обеспечивать растекаемость припоя и длительную сохраняемость паяльной пасты без изменения ее свойств. Флюс также должен обеспечивать такое снижение поверхностного натяжения, чтобы пленка припоя при растекании за счет капиллярных и гравитационных сил не имела разрывов сплошности и раковин в объеме.

**Активность флюса и активатора** наиболее простым способом определяется тензометрическим менискографом для соответствующих подложек и припоя. При этом в выбранном температурном интервале пайки должен образовываться хорошо сформировавшийся мениск за полное время смачивания, как правило, не превышающее 2 с.

**Коррозия** является наиболее трудно определяемым параметром, характеризующим воздействие связки после пайки на паяное соединение. Прямой способ измерения скорости коррозии может быть проведен определением потери массы макетных образцов в виде пластинки паемого металла с расплавленной каплей припоя в камере влажности. После соответствующей смывки остатков связки образцы выдерживаются при 50°С в течение 100 ч в условиях морской атмосферы при влажности 98...100%.

Руководствуясь данными по потере массы и шкалой коррозионной стойкости по ГОСТ 9671-61, можно классифицировать связки как

малоактивированные (балл 1), среднеактивированные (балл 2-3) и сильноактивированные (балл 4-5). Косвенным методом определения коррозионной активности является измерение сопротивления изоляции диэлектрика (стеклотекстолита) между проводниками в виде двух взаимопроникающих гребенок, состоящих в общем случае из семи проводников, расположенных на расстоянии 0,3 мм друг от друга. При этом сопротивление изоляции для мало-, средне- и сильноактивированных связей составляет  $10^{11} \dots 10^{13}$ ,  $10^9 \dots 10^{11}$  и  $10^6 \dots 10^7$  Ом соответственно. Замеры проводятся без отмытки остатков связки после пайки. После отмытки сопротивление изоляции диэлектрика должно быть не ниже  $10^{14}$  Ом. Другими косвенными методами являются измерение сопротивления водной вытяжки связки, определение скорости травли зеркала меди на стеклянной подложке, ускоренные электрохимические методы измерения скорости коррозии. К сожалению, корреляции данных по коррозии, полученных различными способами для широкого класса флюсов, в настоящее время не существует.

**Фактор растекания** припойных паст на различных подложках, как правило, превышает 90% и только для индийсодержащих припоев эта величина находится в пределах 80...87%.

**Реология** паст типична для концентрированных суспензий. Вязкость припойной пасты измеряется в диапазоне значений скорости сдвига, составляющей несколько порядков. Такую вязкость наиболее удобно измерять вискозиметром "Brookfield" с системой "Reotest" и соответствующим набором шпинделей, с непрерывной регистрацией вязкости на электронном самописце. Этот же прибор удобно применять и для исследования механической устойчивости суспензий при различных условиях. По данным фирмы "Alfa metalz", в зависимости от способа дозирования паст следует регулировать их вязкость в следующих пределах: для дозирования зондом 50...250 Па·с; для дозирования валиком 100...300 Па·с; для пневмодозирования из тубов 200...450 Па·с; нанесение сеткографией 500...700 Па·с; нанесение через трафарет 600...900 Па·с.

**Адгезия** пасты к паяемой контактной площадке не выражается однозначно и зависит от капиллярных сил, когезии и адсорбции на поверхности компонентов связки. Тестом для проверки адгезии пасты качества нанесения служит пневмодозировка паст через иглу Ø0,8...1,8 мм или через трафарет с рядом последовательно уменьшающихся ячеек на испытываемую поверхность

подложки.

**Связка** в зависимости от требований к технологии отмывки может быть гидрофильной или гидрофобной. В первом случае связка отмывается после пайки водой или водоспиртовой смесью, а во втором случае - спиртобензиновой, спиртофреоновой или фреоном. Если потери массы растворителя в связке в течение 6 ч непрерывного дозирования через трафарет составляют 0...10%, то ее можно классифицировать как невысыхающую, при потерях массы 10...25 и 25...50% - как медленно и быстро высыхающую соответственно. Уменьшение массы растворителя в связке на 50% приводит к увеличению вязкости более чем на два порядка, что резко изменяет условия дозировки.

**Жизнеспособность** паст в герметичной упаковке составляет 6...12 мес. В зависимости от состава (по ТУ ИЭС 417-84), это свойство паст после нанесения на контактные площадки для пайки может сохраняться от одних суток до нескольких месяцев.

**Температурный интервал** пайки определяется, прежде всего, типом используемого припоя, флюсом и активатором и в значительной степени зависит от скорости смачивания и растекания припоя по поверхности подложки. Высокое значение фактора растекаемости обеспечивает образование паяного соединения с хорошо сформировавшейся галтелью, без газовых пузырей в шве и без выноса связкой шариков припоя из зоны пайки.

**Скорость нагрева** при пайке припойными пастами может меняться в пределах от 0,2 до 400°C/с (паста 11222 по ТУ ИЭС 417-84) и существенно зависит от термической устойчивости флюса и активатора.

**Способ отмывки** после пайки должен быть выбран таким образом, чтобы не только устранить явления коррозии паяного соединения, но и некоррозионные остатки связки, которые препятствуют нанесению защитных лаков и покрытий на изделие. Качество отмывки проверяется оптическими и спектральными методами с помощью вторичной ионной эмиссии.

В конечном счете, применение припойных паст повышает производительность за счет уменьшения затрат труда, расхода материалов и улучшения надежности и качества паяных соединений. Разработка эффективных и технологичных припойных паст является актуальной задачей современного материаловедения. Решение ее позволит наиболее полно использовать в промышленности автоматизированные системы пайки.

Нанесение припойных паст на контактные площадки печатных плат может осуществляться либо методом трафаретной печати, либо с помощью дозатора.

Трафаретная печать выполняется на специальном технологическом оборудовании. Суть процесса заключается в продавливании пасты через отверстия в специальном трафарете резиновым ракилем. Расположение и форма отверстий в трафарете соответствуют расположению и форме контактных площадок, на которые требуется нанести пасту. Доза пасты определяется размерами отверстия и толщиной трафарета, который изготавливают из тонкой листовой нержавеющей стали. Диаметр частиц порошка припоя для трафаретной печати обычно составляет 5-50 мкм. Нанесение паяльной пасты производится одновременно на все контактные площадки печатной платы до размещения на ней компонентов. Способ трафаретной печати отличается высокой производительностью процесса, равномерностью нанесения пасты по всей поверхности контактных площадок, хорошей воспроизводимостью процесса, и в то же время большой трудоемкостью подготовительных операций.

Нанесение пасты дозатором имеет свои преимущества. Он не требует больших затрат на подготовку производства и, поэтому, является более гибким и более универсальным способом дозирования паст. Дозирующее устройство значительно проще и дешевле, чем оборудование для трафаретной печати. К тому же дозатор можно встраивать в паяльное оборудование, что позволяет совместить дозирование паяльной пасты с процессом пайки в единый технологический цикл.

Процесс нанесения паяльной пасты дозатором выполняется в следующей последовательности. Пасту заправляют в туб с наконечником в виде иглы, имеющей внутреннее отверстие диаметром 0,4-0,8 мм. С противоположной стороны к тубу присоединяют шланг, по которому от устройства очистки подается сжатый воздух. При ручном дозировании управление подачей воздуха в туб осуществляют нажатием на педаль, которая замыкает цепь питания электропневмоклапана. В составе сборочно-монтажного оборудования управление дозированием паст осуществляется системой ЧПУ по программе. Величина дозы пасты зависит от вязкости пасты, диаметра отверстия в игле, давления воздуха и времени дозирования.

Выбор способа дозирования пасты определяется исходя из конкретных условий производства. Трудоемкость нанесения паяльной пасты дозатором включает в себя трудоемкость подготовки дозатора к работе (очистка туба, заполнение его пастой, наладка режима дозирования) и трудоемкости операции дозирования. Трудоемкость процесса трафаретной печати включает в себя трудоемкость разработки топологии трафарета; изготовления фотошаблона, маски и трафарета; трудоемкость подготовки оборудования и трудоемкость самого процесса нанесения паяльной пасты на платы. Проведен сравнительный анализ трудоемкости обоих способов дозирования и рекомендуется:

- при объеме выпуска до 400 модулей нанесение паяльной пасты осуществлять с помощью дозатора;
- при объеме выпуска 1100 модулей нанесение паяльной пасты производить трафаретной печатью;
- при объеме выпуска от 400 до 1100 модулей способ дозирования выбирать исходя из конкретных условий производства с учетом конструктивных особенностей плат и трудоемкости их изготовления.

Таким образом, в мелкосерийном производстве, отличающимся малыми объемами выпуска и большой номенклатурой изделий, наиболее целесообразно для нанесения паяльных паст применять пневмодозатор.

### 3. Математическое моделирование кинетики формирования паяных соединений

В главе 1 было показано, что основными факторами, от которых зависит прочность паяных соединений, являются температура  $T$  и время пайки  $\tau$ , величина зазора  $a=2l$  (Рис.2.4) и скорость охлаждения. Отработку режимов пайки в производстве технологи производят, используя свой практический опыт и метод проб и ошибок. В лучшем случае применяют метод математического планирования экспериментов. Этот метод позволяет в каждом конкретном случае выполнить оптимизацию режимов, но не раскрывает сути происходящих физико-химических процессов.

Для прогнозирования надежности соединений и управления процессом их формирования, необходима феноменологическая модель, позволяющая рассчитывать основные кинетические параметры процесса. Проблемы диффузии в многофазных системах, кинетика зарождения и роста фаз в диффузионной зоне анализируется в монографиях/5,6/. Однако в этих работах рассматривается чисто диффузионная кинетика процесса растворения в зазоре, при которой предполагается, что в момент  $\tau=0$  и  $T=T_l$  на межфазной границе сразу устанавливается профиль концентраций  $C_1^p$  и  $C_2^p$ , соответствующий равновесной диаграмме состояния (рис. 2. 1 а,б и рис. 3. 1 б,в). При анализе процессов массопереноса на кинетической стадии растекания в случае кратковременного нагрева в малых зазорах, что имеет место при лазерной пайке, необходимо рассматривать более общий случай, когда при  $\tau=0$  в контакте находятся фазы исходного состава  $C_1''$  и  $C_2''$  (рис. 2. 1 в и 3. 1 г). Феноменологическая теория массопереноса в капиллярных зазорах, учитывающая указанные физико-химические особенности, разработана В. С. Новосадовым и А. А. Алласом. Данная теория позволяет моделировать кинетические закономерности диффузионных процессов (скорость движения межфазных границ  $Y(\tau)$ , время завершения кинетических стадий, поле концентраций в фазах  $C_2(x, \tau)$ , количество жидкой фазы), начиная со стадии смачивания (при  $t>10^{-7}$ с) и до полного исчезновения жидкой прослойки при изотермической кристаллизации.

Получение точного аналитического решения нестационарных диффузионных задач на движущихся границах для капиллярного зазора вызывает непреодолимые математические трудности. В связи с этим были получены приближенные аналитические решения, позволяющие исследовать влияние температуры, особенности диаграммы состояния и исходной величины

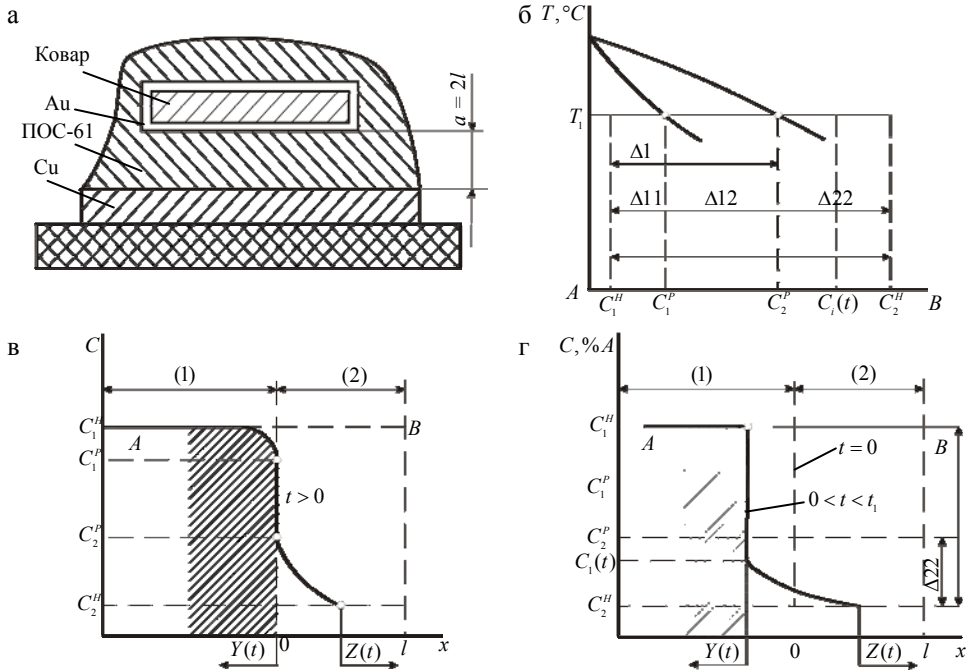


Рис. 3. 1. Схема взаимодействия металла А (фаза 1) с припоем В (фаза 2) в зазоре  $a = 2l$  при диффузионной и граничной кинетике растворения.

а – схема паяного соединения;

б – участок диаграммы состояния ( $C_i^H$  - начальная,  $C_i^P$  - равновесная  $C_i(t)$  - неравновесная концентрации на межфазной границе) при  $T=T_1$ ;

в – распределение концентрации  $C_i(x, t)$  в фазах 1 и 2 ( $t \geq 0$ ) при диффузионной кинетике растворения;

г – распределение концентрации  $C_2(x, t)$  в фазе 2 в случае граничной кинетики при  $t=0$  ( $C_i(t) = C_2^H$ ) и  $0 < t < t_f$  ( $C_i(t) < C_2^P$ )

плоского зазора на кинетику процессов массообмена.

Сущность приближенных решений состоит в использовании аппроксимаций концентрационных профилей в твердой  $i=1$  и жидкой  $i=2$  фазах в виде полиномов. Корректность аппроксимаций проверяется сравнением с решениями, получаемыми численными методами, и экспериментальными данными.

В настоящей работе процессы массопереноса рассматриваются в одномерной модели применительно к бинарной диаграмме состояния при постоянной температуре и давлении для ювенильных поверхностей. В данной модели не учитывается также дефектность структуры поверхностного слоя твердой фазы, диффузионная проницаемость которого определяется предысторией ее получения. Вышеизложенные допущения являются общепринятыми и во многих случаях, как показывает сравнение расчетов с экспериментом, не являются принципиальными.

В реальных условиях при  $\tau=0$  в контакте обычно находятся твердая фаза А (состава  $C_1^H$ ) и расплав В (состава  $C_2^H$ ), а концентрационный профиль имеет вид ступени (Рис. 3. 1 в). При  $t>0$  на межфазной границе  $Y(t)$  в процессе растворения начинает увеличиваться концентрация  $C_2(t) \Big|_{Y(t)} = C_i(t) > C_2^H$ .

Время достижения на межфазной границе равновесной концентрации  $C_i(t_2) = C_2^P$  определяет продолжительность протекания стадии граничной кинетики.

Поскольку нас интересуют процессы с малым временем нагрева, в настоящем рассмотрении пренебрегаем диффузионным потоком в твердую фазу и конвекцией расплава в капиллярном зазоре. Такая постановка задачи помимо существенного упрощения имеет самостоятельный практический интерес.

Для нахождения неизвестных кинетических параметров необходимо решить уравнение диффузии для фазы - 2 (жидкость)

$$\frac{\partial C_2(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_2 \frac{\partial C_2(x,t)}{\partial x} \right) \quad (3. 1)$$

при следующих начальных и граничных условиях

$$C_2(x, 0) = C_2^n; \quad C_2(x, t) \Big|_{x=Y(t)} = C_i(t), \quad \frac{\partial C_2}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0 \quad (3.2)$$

и условии массобаланса на движущейся границе

$$\left( C^n - C_i(t) \right) - \frac{\partial Y(t)}{\partial t} = D_2 \frac{\partial C_2(x, t)}{\partial x} \Big|_{Y(t)} \quad (3.3)$$

В нашем случае имеются три неизвестные функции  $C_2(x, t)$ ,  $C_i(t)$  и  $Y(t)$ , для определения которых необходимо задать еще одно условие. Под полным потоком растворения  $J$  в нашем случае будем подразумевать количество атомов  $A$  твердой фазы, оторвавшихся от межфазной границы. Предполагаем, что механизм переноса вещества как в твердой, так и в жидкой фазах чисто диффузионный и растворение не лимитируется отрывом атомов  $A$  от межфазной границы, что характерно для подавляющего большинства металлических систем. Запишем условие непрерывности нестационарного потока

$$J = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{Y(t)} \quad (3.4)$$

Поток  $J$  представляет собой сумму двух потоков: граничного

$$J_B = \beta \cdot \omega \cdot \Delta C_B = k \cdot \Delta C_B \text{ и диффузионного } J_d = -D_2 \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{Y(t)} \cdot \left( 1 - \frac{\Delta C_2}{\Delta_{22}} \right),$$

$$J = J_e + J_d. \quad (3.5)$$

где  $\beta$  - удельный граничный диффузионный поток [ $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ] и имеет смысл потока при одиночной разности концентраций на  $Y(t)$ ,  $\omega$  - объем, приходящийся на один атом, а  $\Delta C_2 = C_2^p - C_i(t)$ . Исходя из весового вклада потоков  $J_e$  и  $J_d$ , поток  $J$  можно представить в виде :

$$J = K \left( C_2^p - C_i(t) \right) - D_2 \frac{C_i(t) - C_2^n}{\Delta_{22}} \cdot \frac{\partial C_2(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=Y(t)}, \quad \Delta_{22} = C_2^p - C_2^n \quad (3.6)$$

Таким образом, имеем систему уравнений (3. 1) - (3. 6) для определения трех неизвестных кинетических параметров:  $C_2(x, t)$ ,  $C_i(t)$  и  $Y(t)$ .

Получение точного аналитического решения поставленной задачи вызывает существенные математические трудности. Рассмотрим приближенное решение. На первом этапе растворения ( $t < t_l$ ) распределение

концентрации аппроксимируем полиномом  $1,5 < n < 3$

$$C_1(x, t) = C_2'' + \left( C_i(t) - C_2'' \right) \cdot \left( \frac{Z(t) - x}{Z(t) \cdot Y} \right)^n, \quad 1,5 < n < 3, \quad (3.7)$$

где  $Z(t)$  фронт концентрационного возмущения (за которым отсутствует поток атомов А, определяемый следующим образом:

$$C(x, t) = C_2'' \text{ при } Z(t) \leq x \leq l, \quad \left. \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right|_{x=Z(t)} = 0$$

Уравнение (3. 1) заменим интегральным условием концентрационного баланса

$$\int_{Y(t)}^{Z(t)} \frac{\partial C(x, t)}{\partial t} dx = \int_{Y(t)}^{Z(t)} \frac{\partial}{\partial x} \left( D_2 \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right) dx \quad (3.8)$$

Подставляя (3. 7) в (3. 3), (3. 6), (3. 8), получаем систему дифференциальных уравнений для определения  $C_i(\tau)$ ,  $Z(\tau)$ ,  $Y(\tau)$  с однородными начальными условиями

$$\begin{cases} \frac{1}{n+1} \left( \left( C_i(t) - C_2'' \right) (Z(t) - Y(t)) \right)' + \left( C_i(t) - C_2'' \right) \cdot Y'(t) = D_2 n \frac{C_i(t) - C_2''}{Z(t) - Y(t)} \\ \left( C_1'' - C_i(t) \right) \cdot Y'(t) = -n D_2 \frac{C_i(t) - C_2''}{Z(t) - Y(t)} \\ k \cdot \Delta_{22} = n \cdot D_2 \frac{C_i(t) - C_2''}{Z(t) - Y(t)} \end{cases} \quad (3.9)$$

введем безразмерные координаты и обозначения

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= \frac{K}{D_2} x; \quad \tau = \frac{K^2}{D_2}, \quad \tilde{z} = \frac{Kl}{D_2}, \quad \delta(\tau) = \frac{K}{D_2} \cdot (Z(\tau) - Y(\tau)), \\ \xi(\tau) &= \frac{K}{D_2} \cdot Y(\tau), \quad \nu(\tau) = \frac{C_i(\tau) - C_2''}{\Delta_{22}}, \quad \varepsilon = \frac{C_2^p - C_2''}{C_1'' - C_2''} = \frac{\Delta_{22}}{\Delta}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

В новых координатах и обозначениях система (2. 9) примет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{n+1} \left( \nu(\tau) \cdot \delta(\tau) \right)' + \nu(\tau) \cdot \xi'(\tau) = n\nu(\tau)/\delta(\tau), \\ (1/\varepsilon - \nu(\tau)) \cdot \xi'(\tau) = -n \cdot \nu(\tau)/\delta(\tau), \\ 1 = n\nu(\tau)/\delta(\tau). \end{array} \right. \quad (3.11)$$

Решение системы (3.11) имеет вид

$$\nu(\tau) = \frac{1}{2\varepsilon} \left( 1 + 2 \cdot \cos \left( \frac{F_i}{3} + \frac{4\pi}{3} \right) \right), \quad (3.12)$$

$$\delta(\tau) = n \cdot \nu(\tau), \quad (3.13)$$

$$\xi(\tau) = -\varepsilon \cdot \frac{n}{n+1} \nu^2(\tau), \quad (3.14)$$

$$\text{где } F_i = \arccos \left( q(\tau) \cdot 4\varepsilon^3 \right), \quad (3.15)$$

$$q(\tau) = \frac{n+1}{n} \cdot \frac{3}{2 \cdot \varepsilon} \cdot \tau - \frac{1}{4\varepsilon^3}. \quad (3.16)$$

Решение (3.12) - (3.14) будет верно до момента  $\tau_1 = \min(\tau_{11}, \tau_{12})$ . Для большого зазора  $\varepsilon$  (условие малости зазора будет определено ниже) это время будет определяться условием  $\nu(\tau_{11}) \approx 1$ , т. е. достижением на  $Y(\tau)$  равновесной концентрации  $C_i(\tau) = C_2^p$  (Рис. 3. 2, а-I). Для малого зазора условие  $\tau_1 = \min(\tau_{12})$  определяется временем достижения фронтом концентрационного возмущения оси шва  $Z(\tau_1) = \varepsilon$  (Рис. 3. 2, а-II) или

$$\delta(\tau_{12}) + \xi(\tau_{12}) = \varepsilon \quad (3.17)$$

Используя (3.12) - (3.14), определяем  $\tau_{11}$  и  $\tau_{12}$

$$\tau_{11} = \frac{n}{n+1} (1 - \frac{2}{3} \cdot \varepsilon); \quad (3.18)$$

$$\tau_{12} = \frac{n}{n+1} \cdot 2 \varepsilon^{1/4} \cdot \frac{1}{4\varepsilon^3} \cos \left( 3 \cdot \arccos(\varepsilon \nu_1 - 0,5) \right), \quad (3.19)$$

$$\text{где } \nu_1 = \frac{n+1}{2\varepsilon} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - 4\varepsilon \cdot \frac{1}{n(n+1)} \cdot \varepsilon} \right). \quad (3.20)$$

Исследование системы (3.11) показывает, что

$$\bar{Z}(\tau) = n\nu(\tau) - \varepsilon \frac{n}{n+1} \cdot \nu^2(\tau) \quad (3.21)$$

и  $\bar{z} = \left(1 - \frac{\varepsilon}{n+1}\right) \cdot n$ , где  $\bar{z}$  - соответствует такому зазору, что фронт концентрационного возмущения  $\bar{Z}(\tau)$  и безразмерная концентрация на межфазной границе  $\nu(\tau)$  одновременно достигают соответственно значения  $\bar{Z}(\tau) = \bar{z}$ ,  $\nu(\tau) = 1$ . Таким образом, критерием оценки величины зазора может служить неравенство

$$\bar{z} \geq n \left(1 - \varepsilon \frac{1}{n+1}\right), \quad (3.22)$$

при  $\bar{z} < n \left(1 - \varepsilon \frac{1}{n+1}\right)$  - малый зазор. (3.22-1)

В этом случае  $\tau_1 = \tau_{12}$  и  $Z_1(t)$  достигает оси шва раньше, чем концентрация на межфазной границе станет равновесной (Рис. 3.2, а-II).

Если  $\bar{z} > n \left(1 - \varepsilon \frac{1}{n+1}\right)$  - большой зазор (3.22-2)

огда при  $\tau_1 = \tau_{\Gamma} = \tau_{11}$ : концентрация на межфазной границе становится равновесной раньше, чем фронт концентрационного возмущения достигает оси шва. Таким образом, продолжительность периода граничной кинетики  $\tau_{\Gamma} = \tau_{11}$ . Дальнейшее рассмотрение производим раздельно в зависимости от выполнения условия (3.22). Рассмотрим кинетику процесса растворения для малого зазора. Тогда при  $\tau_1 = \tau_{12}$  имеем

$$\nu(\tau_1) = \nu_1; \quad \delta(\tau_1) = n\nu_1, \quad \xi(\tau_1) = -\varepsilon \frac{n}{n+1} \nu_1^2 \quad (3.23)$$

При  $\tau > \tau_1$   $Z_2(\tau_1) = \bar{z}$  вместо (3.7) используем новую аппроксимацию

$$C(x, \tau) = C_l(\tau) + \left(C_i(\tau) - C_2^n\right) \cdot \left(\frac{\bar{z} - x}{\bar{z} - \xi(\tau)}\right)^n. \quad (3.24)$$

Тогда интегральное условие концентрационного баланса для аппроксимации (2.24) примет вид;

$$\begin{aligned} & \left( C_i(\tau) - C_2^n \right)' (ж - \xi(\tau)) - \frac{n}{n+1} \left( (C_i(\tau) - C_l(\tau)) (ж - \xi(\tau)) \right)' = \\ & = n \cdot \frac{C_i(\tau) - C_l(\tau)}{ж - \xi(\tau)}. \end{aligned} \quad (3.25)$$

Система аналогичная (3.11) имеет вид

$$\begin{cases} \nu'(\tau) \cdot \delta(\tau) - \frac{n}{n+1} (\omega(\tau) \cdot \delta(\tau))' = n \cdot \frac{\omega(\tau)}{\delta(\tau)}; \\ \left( \frac{1}{\varepsilon} - \nu(\tau) \right) \cdot \delta'(\tau) = n \frac{\omega(\tau)}{\delta(\tau)}; \\ 1 = n \cdot \frac{\omega(\tau)}{\delta(\tau)}, \end{cases} \quad (3.26)$$

где  $\omega(\tau) = \frac{C_i(\tau) - C_l(\tau)}{\Delta_{22}}$

с начальными условиями (Рис 3. 2, б-II)

$$\nu(0) = \nu_1, \quad \delta(0) = n\nu_1, \quad \omega(0) = \nu_1 \quad (3.27)$$

$$\frac{ж}{\varepsilon} \ln \frac{\delta(\tau)}{n \cdot \nu} - \frac{1}{2(n+1)} \cdot (\delta^2(\tau) - (n\nu_1)^2) = \tau; \quad (3.28)$$

остальные функции  $\nu(\tau)$  и  $\omega(\tau)$  определяются по формулам

$$\nu(\tau) = \left( \frac{1}{\varepsilon} - \frac{ж}{\varepsilon \cdot \delta(\tau)} + \frac{\delta(\tau)}{n+1} \right), \quad (3.29)$$

$$\omega(\tau) = \frac{1}{n} \cdot \delta(\tau). \quad (3.30)$$

Решение (3.28-3.30) верно до момента  $\tau_1 = \tau_{12} + \tau_{22}$ , когда  $\nu(\tau_{22}) = 1$  (Рис. 3. 2, в-II). Значение  $\delta(\tau_{22})$  в момент времени определяется по формуле

$$\delta(\tau_{22}) = \frac{n+1}{2} \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \left( \sqrt{1 + 4 \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)^2} \cdot \frac{ж}{n+1}} - 1 \right) = \bar{\delta}. \quad (3.31)$$

Время  $\tau_{22}$  и значения других неизвестных определяется из

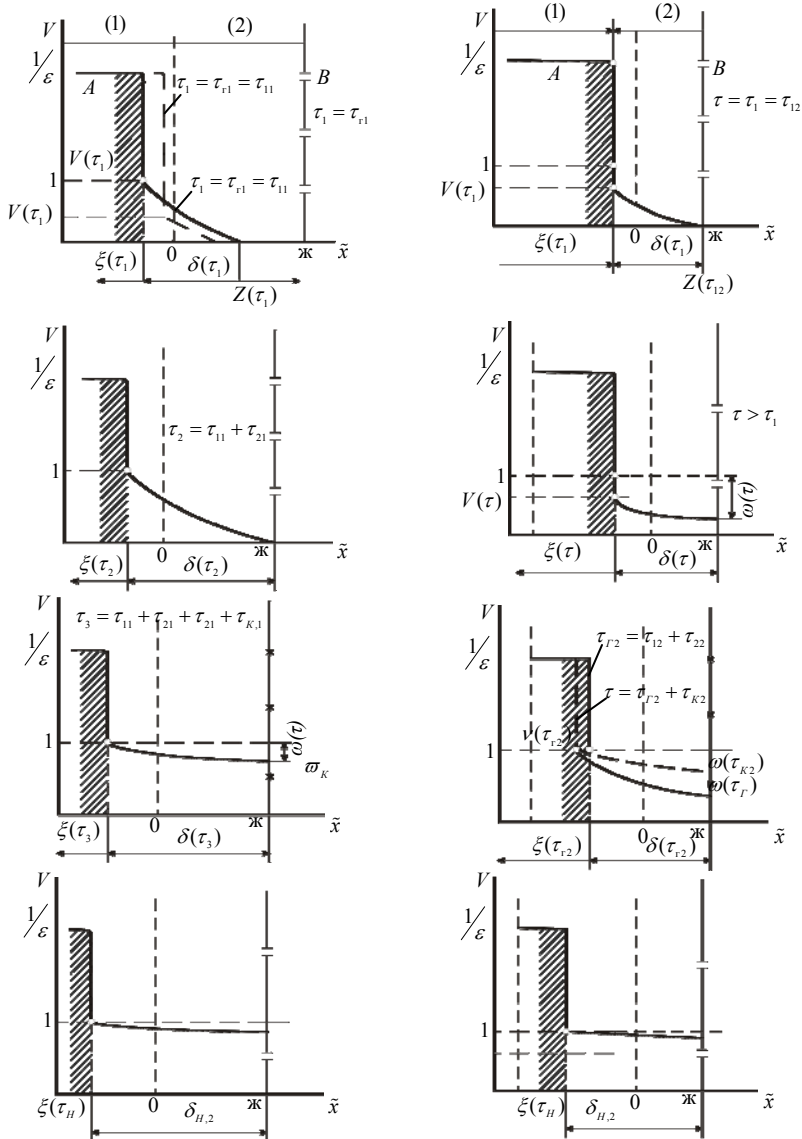


Рис. 3. 2. Граничная кинетика растворения (в безмерных координатах  $\tilde{x}$  и  $\tau$ ), для большого и малого зазора.

I – большой зазор  $ж = 5$ ; I, а – конец граничной кинетики  $v(\tau) = 1$ ;  
 I-б,  $Z(\tau_K)$ , достигает оси шва  $ж$ ; I, в – концентрация на оси шва  
 $\omega = \omega(\tau_K)$ ; I, г – завершение стадии насыщения, концентрация на оси  
 шва  $\omega(\tau_K) = 10^{-2}$

II – малый зазор  $ж = 1$ ; II, а -  $Z(\tau_{12})$  достигает оси шва  $ж$ ; II, б –  
 концентрация на оси шва  $\omega(\tau)$ , на межфазной границе  $v(\tau) < 1$ ;

II, в – конец граничной кинетики  $v(\tau_H) = 1$ , концентрация на оси  
 шва  $\omega(\tau_H) = 10^{-2}$

$$\tau_{22} = \frac{ж}{\varepsilon} \cdot \ln \frac{\delta}{n \cdot v_1} - \frac{1}{2(n+1)} \left( \bar{\delta}^2 - (n \cdot v_1)^2 \right), \quad (3.32)$$

$$\omega(\tau_{22}) = \frac{1}{n} \bar{\delta}. \quad (3.33)$$

Для  $\tau > \tau_\Gamma$  (Рис. 3. 2, в-II) используем новую аппроксимацию

$$C(x, \tau) = C_l(\tau) + \left( C_2^p - C_l(\tau) \right) \cdot \left( \frac{ж - x}{ж - \xi(\tau)} \right)^n. \quad (3.34)$$

Интегральное условие концентрационного баланса для аппроксимации (3. 34) примет вид

$$\frac{n}{n+1} \left( \left( C_2^p - C_l(\tau) \right) (ж - \xi(\tau)) \right)' = \frac{n C_2^p - C_l(\tau)}{ж - \xi(\tau)}. \quad (3.35)$$

Система, аналогичная (3. 11) примет вид

$$\begin{cases} -\frac{n}{n+1} \left( \omega(\tau) \cdot \delta(\tau) \right)' = n \cdot \frac{\omega(\tau)}{\delta(\tau)}; \\ \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \delta'(\tau) = n \cdot \frac{\omega(\tau)}{\delta(\tau)}, \end{cases} \quad (3.36)$$

Решая систему (3. 26), получаем, что неизвестная функция  $\delta(\tau)$  в любой момент времени находится как решение трансцендентного уравнения

$$\text{где } \omega(\tau) = \frac{C_2^p - C_i(\tau)}{\Delta_{22}}, \quad \delta(\tau) = \text{ж} - \xi(\tau).$$

Заметим, что для  $\tau > \tau_2$  условие (3. 6) превращается в тождество. Начальные условия для системы (3. 36) примут вид

$$\omega(0) = \frac{1}{n} \cdot \bar{\delta}, \quad \bar{\delta}(0) = \bar{\delta}, \quad (3. 37)$$

где  $\bar{\delta}$  определяется из (3. 31).

Решая систему (3. 36), получаем, что неизвестная функция  $\delta(\tau)$  в любой

момент времени  $\tau > \tau_{12} + \tau_{22}$  находится как решение трансцендентного уравнения

$$\left[ -A \left( \delta(\tau) - \bar{\delta} \right) - \frac{1}{2} \left( \delta^2(\tau) - \bar{\delta}^2 \right) \right] - A^2 \ln \frac{A - \delta(\tau)}{A - \bar{\delta}} \cdot \frac{1}{n+1} = \tau. \quad (3. 38)$$

Неизвестная функция  $\omega(\tau)$  находится по формуле

$$\omega(\tau) = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{n+1}{n} \cdot \frac{A - \delta(\tau)}{\delta(\tau)}, \quad (3. 39)$$

$$\text{где } A = \frac{\text{ж}}{1 - \text{ж}}.$$

Для расчета времени достижения на оси шва любой заданной концентрации  $\omega_\kappa$  (т. е. в прежних переменных  $C_l(\tau_\kappa) = C_2^p - \omega_\kappa \cdot \Delta_{22}$  при помощи формулы (3. 39) находим  $\bar{\delta}_\kappa$ , соответствующее выбранному значению

$$\omega = \frac{C_2^p - C_l(\tau_\kappa)}{\Delta_{22}}, \quad (3. 40)$$

$$\delta_K = \frac{\text{ж}}{1 - \varepsilon + \varepsilon \frac{n}{n+1} \cdot \omega_K} \quad (3.41)$$

Затем, подставляя в (3.38), получаем

$$\tau_{K_2} = \left( -A(\delta_K - \bar{\delta}) - \frac{1}{2}(\delta_K^2 - \bar{\delta}^2) - A^2 \ln \frac{A - \delta_K}{A - \bar{\delta}} \right) \cdot \frac{1}{n+1} \quad (3.42)$$

Тогда  $\tau_K$  находится по формуле

$$\tau_K = \tau_{12} + \tau_{22} + \tau_{K2} \quad (3.43)$$

Время завершения процесса растворения (время насыщения) будем рассматривать как время  $\tau_n$  достижения на оси шва концентрации  $\omega_n = 0,01$  (т. е.  $C_l(\tau_n) = C_2^p - 0,01 \cdot \Delta_{22}$ ). Время  $\tau_n$  находится аналогично  $\tau_K$ , только в расчетные формулы вместо  $\omega_K$  и  $\delta_K$  необходимо подставлять  $\omega_n$  и соответствующие ему  $\delta_n$ . Заметим, что  $\delta_n$  представляет собой ширину шва, образовавшегося к моменту насыщения (Рис. 3.2, г-II). Расстояние, пройденное межфазной границей, определяется из

$$|\xi(\tau_n)| = |\text{ж} - \delta_n|. \quad (3.44)$$

Рассмотрим теперь большой зазор, т. е. выполняется условие (3.22-2),

$$\tau_1 = \tau_{11}, \quad \nu(\tau_1) = 1, \quad \delta(\tau_1) = n, \quad \xi(\tau_1) = -\varepsilon \frac{n}{n+1} \quad (3.45)$$

При  $\tau > \tau_1$ , вместо (3.6) используем новую аппроксимацию вида

$$C(x, \tau) = C_2^H + \Delta_{22} \left( \frac{Z(\tau) - x}{Z(\tau) - Y(\tau)} \right)^n \quad (3.46)$$

Тогда интегральное условие концентрационного баланса для (3.46) примет вид

$$\frac{1}{n+1} (Z(\tau) - Y(\tau))' + Y'(\tau) = \left( n \frac{1}{Z(\tau) - Y(\tau)} \right) \cdot \left( \frac{D_2}{K} \right)^2 \quad (3.47)$$

Система аналогичная (3.11) имеет вид

$$\begin{cases} \frac{1}{n+1} \delta'(\tau) + \xi'(\tau) = n \frac{1}{\delta(\tau)}; \\ -\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \xi'(\tau) = n \frac{1}{\delta(\tau)}, \end{cases} \quad (3.48)$$

где  $\delta(\tau)$  и  $\xi(\tau)$  определены в (3.10). Начальные условия для системы (3.48) следующие

$$\delta(0) = n; \quad \xi(0) = -\varepsilon \frac{n}{n+1}. \quad (3.49)$$

В том случае, когда  $\tau > \tau_1$  условие (3.6) превращается в тождество и решение системы (3.48) с начальными условиями (3.49) имеет вид:

$$\delta(\tau) = \sqrt{2n(n+1)} \cdot \frac{1}{1-\varepsilon} \sqrt{\tau + \frac{n}{2(n+1)}(1-\varepsilon)}; \quad (3.50)$$

$$\xi(\tau) = -\frac{1}{n+1} \cdot \varepsilon \cdot \delta(\tau). \quad (3.51)$$

Решение верно до момента  $\tau_2 = \tau_{11} + \tau_{21}$ , при котором

$$\delta(\tau_{21}) + \xi(\tau_{21}) = \mathcal{J}_1, \quad (3.52)$$

где  $\tau_2$  - время достижения фронтом концентрационного возмущения оси шва (Рис. 3.2, б-II). Подставляя (3.50); (3.51) в (3.52), получаем

$$\tau_{21} = \frac{1-\varepsilon}{2n(n+1)} \left( \left( \frac{\mathcal{J}}{1 - \frac{\varepsilon}{(n+1)}} \right)^2 - n^2 \right). \quad (3.53)$$

Значения функций  $\delta(\tau)$  и  $\xi(\tau)$  в момент времени  $\tau_2 = \tau_{11} + \tau_{21}$  (Рис. 3.2, б-1)

$$\delta(\tau_2) = \frac{\mathcal{J}}{1 - \frac{\varepsilon}{(n+1)}}; \quad (3.54)$$

$$\xi(\tau_2) = -\varepsilon \frac{1}{n+1} \cdot \frac{\mathcal{J}}{1 - \frac{\varepsilon}{(n+1)}}. \quad (3.55)$$

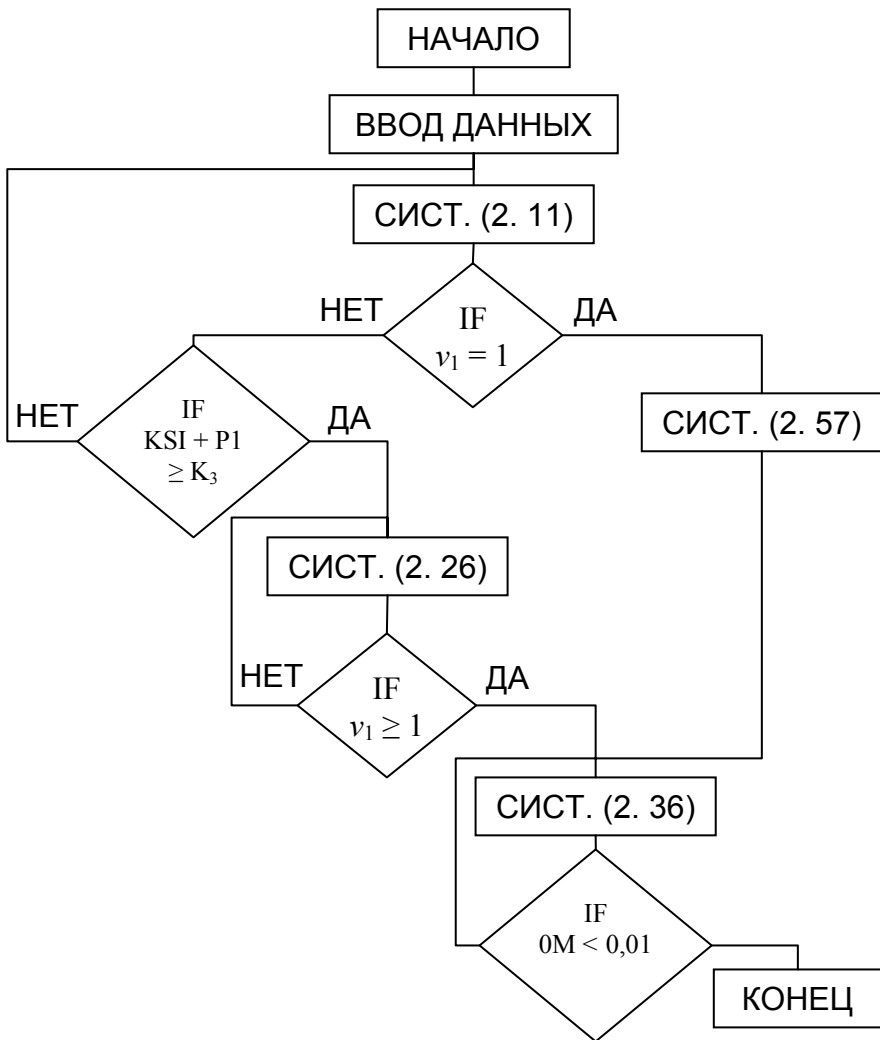


Рис. 3. 3. Структурная схема алгоритма моделирования граничной

При  $\tau > \tau_2 = \tau_{11} + \tau_{21}$  используем аппроксимацию вида (3. 34). Для определения неизвестных функций вновь необходимо решать систему (3. 36) с начальными условиями

$$\delta(0) - \frac{\text{ж}}{1 - \frac{\varepsilon}{(n+1)}} = \bar{\delta}_2, \quad \omega(0) = 1 \quad (3.56)$$

Решение имеет вид (3.38) и (3.39). Незвестная функция  $\delta(\tau)$  в этом случае ищется как решение трансцендентного уравнения

$$\left[ -A \left( \delta(\tau) - \bar{\delta}_2 \right) - \frac{1}{2} \left( \delta^2(\tau) - \bar{\delta}_2^2 \right) - A^2 \ln \frac{A\delta(\tau)}{A - \bar{\delta}_2} \right] = n + 1 \cdot \tau, \quad (3.57)$$

а неизвестная функция находится по формуле

$$\omega(\tau) = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{n + 1}{n} \cdot \frac{A - \delta(\tau)}{\delta(\tau)}.$$

Время  $\tau_3 = \tau_n + \tau_{21} + \tau_{K1}$  достижения на оси шва концентрации  $\omega_K$ , находится аналогично  $\tau_{K2}$

$$\tau_{K1} = \frac{1}{n + 1} \left[ -A \left( \delta_K - \bar{\delta}_2 \right) - \frac{1}{2} \left( \delta_K^2 - \bar{\delta}_2^2 \right) - A^2 \ln \frac{A - \delta_K}{A - \bar{\delta}_2} \right], \quad (3.59)$$

где определяется по (3.41).

где определяется по (3.41). Таким образом, время  $\tau_K$  в этом случае находится по формуле (Рис. 3.2, в-I)

$$\tau_3 = \tau_K = \tau_{11} + \tau_{21} + \tau_{K1}. \quad (3.60)$$

Аналогично определяется время насыщения  $\tau_n$  и в этом случае (Рис. 3.2, г-I)

$$\tau_n = \tau_{11} + \tau_{12} + \tau_{n2}, \quad (3.61)$$

$$\text{где } \tau_{n2} = \frac{1}{n + 1} \left[ -A \left( \delta_n - \bar{\delta}_2 \right) - \frac{1}{2} \left( \delta_n^2 - \bar{\delta}_2^2 \right) - A^2 \ln \frac{A - \delta_n}{A - \bar{\delta}_2} \right] \quad (3.61-1)$$

$$\delta_n = \frac{\text{ж}}{1 - \varepsilon \frac{\varepsilon \cdot n}{(n + 1)} \cdot 0.01}. \quad (3.61-2)$$

На Рис. 3.3. приведена структурная схема алгоритма расчета основных

кинетических стадий формирования спаев в зазоре. Данный алгоритм реализован в компьютерной программе. Программа написана на языке программирования высокого уровня Бейсик, и представляет собой решение систем дифференциальных уравнений методом "Рунге-Кутта-Фельберга" с автоматическим изменением шага. На входе программы необходимо задать значения растворимости в жидкой и твердой фазах для требуемого значения температуры, взятые из диаграмм состояния сплавов, а также величину капиллярного зазора. Программа выполняет расчеты и выводит результаты либо в размерных, либо безразмерных единицах на экран дисплея, или на принтер в виде таблицы результатов. Программа позволяет для заданных значений капиллярного зазора и растворимостей рассчитать время завершения

кинетических стадий, изменение концентрационных полей, ширины диффузионной зоны, величины смещения фронта концентрационного возмущения от момента смачивания до завершения стадии насыщения капиллярного зазора.

В случае пайки выводов микросхем на печатные платы в формировании паяных соединений участвуют медные фольгированные проводники, золоченные выводы интегральных микросхем и расплавленный олово-свинцовый припой ПОС-61. В силу незначительной растворимости свинца в меди эти взаимодействия далее рассматривать не будем. Таким образом, представляет интерес выполнение расчетов для взаимодействия олова с золотом и олова с медью в диапазоне температурного интервала пайки ( $200^{\circ} - 260^{\circ}\text{C}$ ). Из диаграмм состояний соответствующих тройных систем выбираются значения растворимостей по превышению текущего значения температуры над точкой плавления припоя, т. е. ( $200^{\circ} - 260^{\circ}\text{C}$ ), что соответствует  $15 - 75^{\circ}\text{C}$  (табл. 3. 1.).

При этом растворимость меди в припое находится в пределах 3-5 а. т. %, а золота - 10-30 а. т. %.

Результаты расчетов представлены в виде таблицы 3. 2. и графиков зависимости времени завершения стадии граничной кинетики (Рис. 3. 4.) и времени завершения стадии насыщения (Рис. 3. 5.) в зависимости от зазора при различных значениях растворимости. С увеличением зазора наблюдается резко возрастающее влияние растворимости на время насыщения. Зависимость

Таблица 3. 1. Растворимость металлов в припое для заданных значений  $\Delta T$ 

| Система \ $\Delta T$ |    | 15        | 45  | 75  |
|----------------------|----|-----------|-----|-----|
|                      |    | Атомные % |     |     |
| Au                   | Sn | 10        | 17  | 25  |
|                      | Pb | 20        | 28  | 32  |
| Cu                   | Sn | 3         | 4   | 5   |
|                      | Pb | 0,2       | 0,5 | 1   |
| Ni                   | Sn | 0,1       | 0,2 | 0,5 |
|                      | Pb | 1,5       | 1,6 | 2   |

времени завершения граничной кинетики  $\tau_1 = \tau_r$  от зазора, приведенная на Рис. 3. 4. характеризуется максимумом, положение которого  $\bar{x}_{\max}$  зависит от  $\varepsilon$ , что обусловлено кинетическими особенностями растворения в малых зазорах. Очевидно, что при конкретном значении растворимости  $\varepsilon$  с увеличением зазора от  $\bar{x}_1$  до  $\bar{x}_{\max}$  время  $\tau_1$  достижения равновесной концентрации на  $y(t)$  должно возрастать вследствие увеличения протяженности диффузионного пути. При  $\bar{x}_2 > \bar{x}_{\max}$  (Рис. 3. 5.) значения  $\tau_1$  будут снижаться, так как скорость растворения будет возрастать с увеличением зазора, что обусловлено возрастанием градиента концентраций в шве. Из Рис. 3. 4. следует, что каждому значению  $\varepsilon$  соответствует также критическая величина зазора  $\bar{x}_{\text{кр}}$ , начиная с которой  $\tau_1 = \text{const}$ , т. е. граничная кинетика завершается раньше  $C_1(t_r) = C_2^p$  достижения оси шва фронтом концентрационного возмущения.

Как следует из расчетов, абсолютные значения времени завершения граничной кинетики  $\tau_1 = \tau_{21}$  невелики  $0,2 \div 0,5$  с и возрастают с уменьшением растворимости (например, для зазора  $\bar{x} = 1,0$  (50 мкм) при значениях растворимости  $\varepsilon = 0,1; 1,0; 10; 17; 32\%$  время  $\tau_1$  соответствует  $0,5; 0,5; 0,39; 0,34; 0,33$  с.

Смещение фронта концентрационного возмущения при этом лежит в пределах от 0,05 мкм до 10 мкм. Результаты математического моделирования граничной кинетики формирования паяных соединений подтверждаются результатами металлографических исследований (глава 4) паяных соединений, выполненных лазерной пайкой с использованием температурно-временных режимов, полученных в результате расчетов.

Таблица 3. 2.

Кинетические параметры растворения в зазоре с учётом граничной кинетики для малого зазора  $\alpha = 0,5$  ( $l = 25$  мкм, при  $K = 10^{-2}$  см/с,  $D = 5 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с)

| $\varepsilon, \%$ | Время, с |             |          | Ширина диффузионной зоны, мкм |                     |                  | Смещение фронта, мкм |                  |               |
|-------------------|----------|-------------|----------|-------------------------------|---------------------|------------------|----------------------|------------------|---------------|
|                   | $T_{11}$ | $\tau_{21}$ | $\tau_n$ | $\delta(\tau_{11})$           | $\delta(\tau_{21})$ | $\delta(\tau_n)$ | $\xi(\tau_{11})$     | $\xi(\tau_{21})$ | $\xi(\tau_n)$ |
| $\Delta 22$       |          |             |          |                               |                     |                  |                      |                  |               |
| 0,1               | 0,026    | 0,223       | 0,399    | 28,04                         | 28,06               | 28,07            | 0,026                | 0,022            | 0,027         |
| 0,2               | 0,026    | 0,229       | 0,406    | 28,04                         | 28,08               | 28,09            | 0,026                | 0,045            | 0,056         |
| 1                 | 0,026    | 0,229       | 0,413    | 28,06                         | 28,27               | 28,32            | 0,026                | 0,228            | 0,28          |
| 10                | 0,023    | 0,229       | 0,419    | 26,46                         | 28,40               | 28,98            | 0,233                | 2,169            | 2,747         |
| 17                | 0,023    | 0,229       | 0,452    | 26,6                          | 29,78               | 30,96            | 0,402                | 3,55             | 4,729         |
| 32                | 0,023    | 0,229       | 0,504    | 27,02                         | 32,45               | 35,64            | 0,778                | 6,206            | 9,40          |

Для малого зазора  $\alpha = 1,0$  ( $l = 50$  мкм)

| $\varepsilon, \%$ | Время, с |             |          | Ширина диффузионной зоны, мкм |                     |                  | Смещение фронта, мкм |                  |               |
|-------------------|----------|-------------|----------|-------------------------------|---------------------|------------------|----------------------|------------------|---------------|
|                   | $T_{11}$ | $\tau_{21}$ | $\tau_n$ | $\delta(\tau_{11})$           | $\delta(\tau_{21})$ | $\delta(\tau_n)$ | $\xi(\tau_{11})$     | $\xi(\tau_{21})$ | $\xi(\tau_n)$ |
| $\Delta 22$       |          |             |          |                               |                     |                  |                      |                  |               |
| 0,1               | 0,104    | 0,498       | 1,389    | 56,097                        | 56,136              | 56,157           | 0,015                | 0,047            | 0,0705        |
| 0,2               | 0,104    | 0,498       | 1,389    | 56,107                        | 56,186              | 56,227           | 0,020                | 0,099            | 0,1410        |
| 1                 | 0,091    | 0,498       | 1,408    | 55,984                        | 56,386              | 56,572           | 0,092                | 0,494            | 0,6802        |
| 10                | 0,085    | 0,387       | 1,451    | 53,716                        | 56,440              | 57,134           | 0,882                | 3,606            | 4,3           |
| 17                | 0,085    | 0,341       | 1,484    | 52,632                        | 56,478              | 60,678           | 1,539                | 5,374            | 9,574         |
| 32                | 0,081    | 0,338       | 1,540    | 52,610                        | 59,478              | 69,90            | 2,952                | 9,475            | 20,240        |

Для большого зазора  $\alpha = 2,5$  ( $l = 125$  мкм)

| $\varepsilon, \%$ | Время, с |             |          | Ширина диффузионной зоны, мкм |                     |                  | Смещение фронта, мкм |                  |               |
|-------------------|----------|-------------|----------|-------------------------------|---------------------|------------------|----------------------|------------------|---------------|
|                   | $T_{11}$ | $\tau_{21}$ | $\tau_n$ | $\delta(\tau_{11})$           | $\delta(\tau_{21})$ | $\delta(\tau_n)$ | $\xi(\tau_{11})$     | $\xi(\tau_{21})$ | $\xi(\tau_n)$ |
| $\Delta 22$       |          |             |          |                               |                     |                  |                      |                  |               |
| 0,1               | 0,367    | 0,460       | 5,310    | 104,95                        | 125,042             | 125,124          | 0,037                | 0,042            | 0,124         |
| 0,2               | 0,367    | 0,460       | 5,310    | 105,02                        | 125,083             | 125,249          | 0,075                | 0,083            | 0,249         |
| 1                 | 0,367    | 0,461       | 5,337    | 105,29                        | 125,418             | 126,254          | 0,369                | 0,418            | 1,254         |
| 10                | 0,321    | 0,422       | 6,084    | 101,6                         | 129,310             | 138,786          | 3,444                | 4,310            | 13,78         |
| 17                | 0,294    | 0,399       | 6,848    | 99,883                        | 132,509             | 150,400          | 5,653                | 7,509            | 25,40         |
| 32                | 0,272    | 0,381       | 9,162    | 102,19                        | 139,925             | 183,251          | 11,12                | 14,92            | 58,25         |

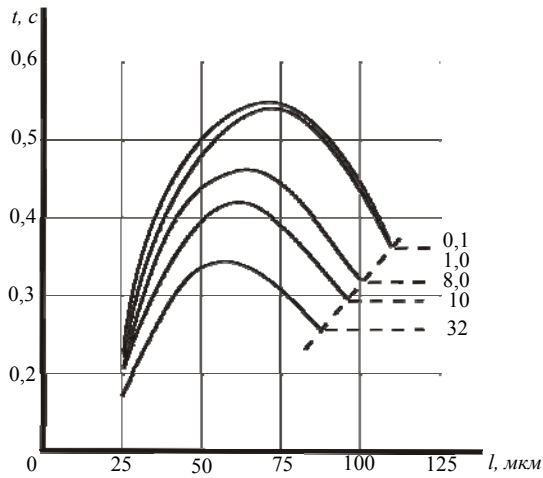


Рис. 3. 4. График зависимости времени завершения стадии граничной кинетики ( $\tau_r$ ) от величины зазора  $\delta$  для различных значений растворимости

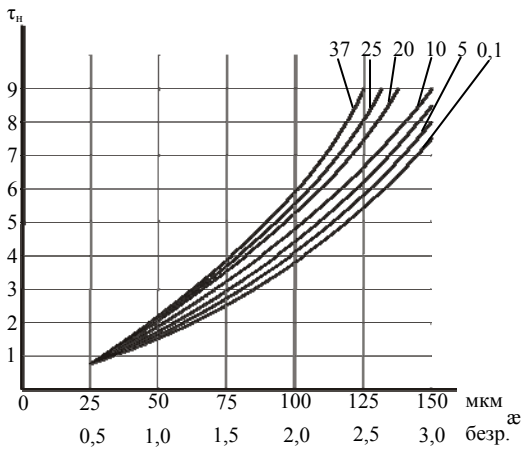


Рис. 3. 5. График зависимости времени насыщения  $\tau_n$  от величины зазора  $\delta$  для различных значений растворимости.  $C$  в %

Таким образом, используя данную модель и разработанное программное обеспечение, становится возможным прогнозирование состояния паяных соединений, полученных в конкретных технологических режимах и наоборот, используя графики (рис. 3. 5.) и (рис. 3. 6.) имеется возможность назначать конкретные технологические режимы пайки, обеспечивающие получение надежных паяных соединений.

## **4. Физико-технологические особенности лазерной пайки**

### **4. 1. Воздействия лазерного излучения на диэлектрические материалы печатных плат**

Лазерное излучение обладает высокой степенью когерентности, т. е. является монохроматичным, и узко направленным, вследствие чего может быть сфокусировано в пятно малого размера, теоретический предел которого - длина волны света. Это позволяет легко получать плотности энергии, обеспечивающие плавление припоя. Используемый в работе непрерывный оптический квантовый генератор (ОКГ) излучает в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн ( $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ ). По этой причине необходимо было получить сведения по влиянию сфокусированного лазерного излучения на материал основы платы в данном спектральном диапазоне, так как сфокусированное излучение лазера в процессе пайки воздействует как на паяемое соединение, так и на близлежащие участки стеклотекстолитового основания печатной платы. Экспериментально было установлено, что стеклотекстолитовое основание печатных плат по отношению к лазерному излучению с длиной волны  $1,06 \text{ мкм}$  является полупрозрачным материалом. Измерения коэффициента пропускания излучения, выполненные с помощью фотоэлектронного умножителя, показывают, что степень ослабления излучения зависит от толщины как одного слоя, так и количества слоев. Образец толщиной  $0,1 \text{ мм}$  пропускает  $9\%$ , а толщиной  $2,0 \text{ мм}$  -  $2,5\%$  излучения. Каждый последующий слой ослабляет излучение примерно в  $1,5 - 2$  раза. Графическое отображение данной зависимости представлено на рис. 4. 1. Стеклотекстолит является композиционным материалом и лазерное излучение, главным образом, рассеивается на неоднородностях материала. Это приводит к тому, что поглощение излучения носит объемный характер. Для нахождения степени поглощения материала платы кроме пропускания необходимо знать величину отраженного сигнала. Результаты измерений показывают, что  $20\%$  потока излучения отражается от поверхности диэлектрика. Само отражение при этом носит диффузный характер, так как поверхность платы является шероховатой. В зависимости от толщины диэлектрической основы платы от  $2,5\%$  до  $9\%$  излучения проходит сквозь плату в виде рассеянного излучения. Остальная же часть -  $70-78\%$  мощности излучения рассеивается в объеме диэлектрика. Для

определения порога начала разрушения диэлектрической основы плат их подвергали воздействию лазерного излучения при непрерывном перемещении с различной скоростью. При этом одновременно следили за порогом начала плавления припоя. На скорости 3 мм/с плавление припоя наступает при плотности мощности  $1,6 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, а начало разрушения материала платы, выраженное в заметном потемнении стеклотекстолита, составляет величину  $3,2 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

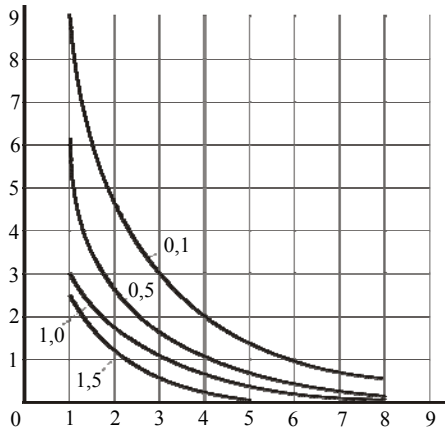


Рис. 4. 1. Зависимость ослабления лазерного излучения от толщины (0. 1...1. 5 мм) и количества образцов, выполненных из стеклотекстолита.

Для скорости 10,0 мм/с плавление начинается при мощности  $3,8 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, а повреждение платы при  $6,5 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. Из этого следует, что применение лазерного излучения с  $\lambda=1,06$  мкм в непрерывном режиме для пайки радиоэлементов возможно в определенном интервале плотности мощности излучения. На рис. 4. 2 представлена диаграмма предельно допустимых режимов пайки. Степень повреждения поверхности материала платы в результате воздействия лазерного излучения можно оценить не только при визуальном осмотре, но и путем измерения поверхностной проводимости, которая является одной из равных характеристик материала платы. Измерения проводили на специально изготовленных тест-платах (рис. 4. 3). Фольгированные проводники шириной от 0,6 до 3 мм разнесены между собой на расстоянии 3 мм и составили

две независимые "гребенки", вложенные друг в друга. Поверхностную проводимость измеряли с помощью мегаомметра Ф4102 и тераомметра Е6-14. Измерения проводили при одновременном воздействии излучения на плату. Луч лазера сканировали поперек проводников тест-платы. При плотностях мощности излучения ниже порогового значения, необходимого для начала плавления припоя и пайки радиоэлементов, величина поверхностной проводимости не уменьшилась, а в ряде случаев увеличивалась в результате испарения поверхностно-связанной воды.

Воздействие пороговых мощностей, приводящих к потемнению платы ( $3,2 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> при скорости 3 мм/с и  $6,5 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> при скорости 10 мм/с, пятно диаметром 4 мм) изменяло проводимость всего на один порядок, с  $10^{-12}$  до  $10^{-11}$  Ом/см при напряжении между проводниками, равным 100 В.

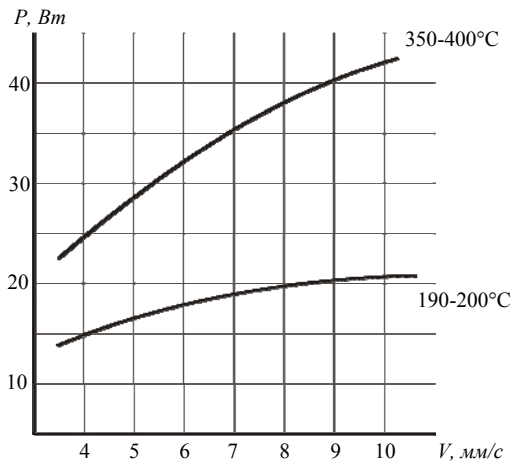


Рис. 4. 2. Диаграмма предельных режимов лазерной пайки для фокального пятна диаметром 2,5-3 мм

I – изотерма, характеризующая порог термодеструкции диэлектрической основы печатной платы (350°C для стеклотекстолита),

II – изотерма начала плавления припоя (200°C)

В случае возгорания платы и ее обугливания сопротивление падало на

несколько порядков и такой режим априорно является недопустимым при отработке процесса лазерной пайки.

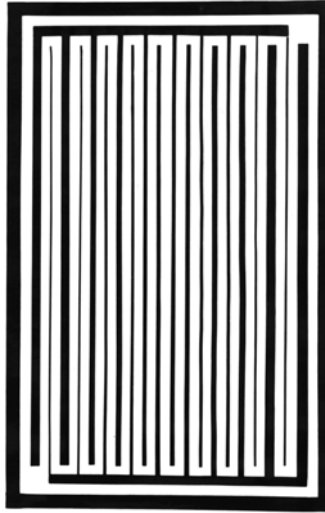


Рис. 4. 3. Внешний вид лицевой стороны тест-платы

Наиболее точно оценить результаты воздействия лазерного излучения различной мощности на материал печатных плат возможно в результате исследования изменения адгезионной прочности фольгированных проводников к стеклотекстолитовой основе печатных плат при их отслаивании на разрывной машине с постоянной скоростью. Диаграмма изменения адгезионной прочности представлена на рис. 4. 4.

Источником излучения служил твердотельный лазер с длиной волны  $\lambda=1,06$  мкм, мощностью 60 Вт. Излучение фокусировалось в пятно круглой формы диаметром 4 мм. Скорость движения платы относительно луча составляла 7,5 мм/с. Диапазон изменения уровня мощности определяли по началу оплавления припоя и по образованию повреждений печатной платы, при этом мощность излучения варьировали в пределах от 18 до 50 Вт.

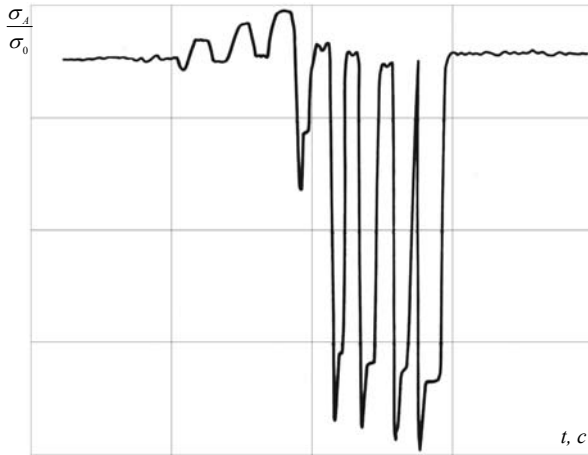


Рис. 4. 4. Диаграмма изменения адгезионной прочности фольгированных проводников при их отрыве от диэлектрической основы.

Сканирование излучения, сфокусированного в пятно диаметром 4мм, по печатной плате производили в поперечном направлении относительно проводников лицевой стороны. Характер влияния лазерного излучения на адгезионную прочность фольгированных проводников различной ширины к основе платы толщиной 1 мм показана на рис. 4. 5.

В процессе лазерного нагрева поверхности платы в результате структурных превращений полимеров изменяется концентрация низкомолекулярных веществ (свободной и связанной воды, остатков мономеров и димеров, продуктов деструкции полимеров и т. д.). Эти низкомолекулярные вещества концентрируются в зоне адгезионного контакта, образуя слабые граничные слои, снижающие адгезию. Удаление низкомолекулярных веществ, в частности воды, из зоны контакта способствует увеличению адгезии. На начальном участке кривых (рис. 4. 5) по мере увеличения мощности излучения наблюдается заметный рост адгезионной прочности. Это связано с удалением низкомолекулярных веществ в результате адсорбционно-десорбционных процессов, протекающих в зоне адгезионного контакта. К этим процессам можно отнести десорбцию низкомолекулярных веществ, адсорбцию

макромолекул на окиси меди по мере увеличения ее толщины и полимеризацию мономеров. На краях проводников эти механизмы проявляются сильнее вследствие лучшей диффузии низкомолекулярных веществ.

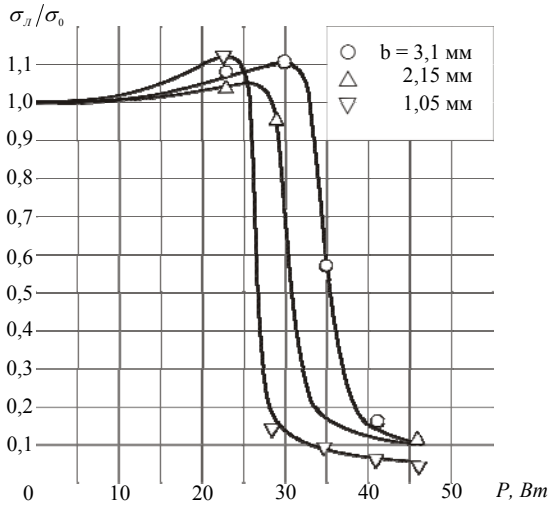


Рис. 4. 5. Зависимость адгезионной прочности фольгированных проводников к диэлектрической основе толщиной 1 мм от мощности лазерного излучения  $b$  – ширина проводников.

При последующем увеличении мощности излучения до порогового значения по мере роста температуры фольгированного проводника и платы наступает довольно резкий спад адгезионной прочности. По результатам предварительных экспериментов температура фольгированного покрытия достигает более  $300^{\circ}\text{C}$ . При этих температурах может происходить термодеструкция полимеров с выделением свободного водорода, участвующего в восстановлении окиси меди, и накопление низкомолекулярных веществ в зоне контакта. В результате термодеструкции нарушается когезионная прочность

основы, которая может оказаться ниже адгезионной, и отслаивание от отдельных участков в этом случае происходит не по границе фольги с платой, а по объему основы. Это подтверждается экспериментами, в которых наблюдалось когезионное отслаивание на отдельных участках. Восстановление окиси меди в эксперименте подтверждается наличием обратной последовательности стадий окрашивания интерференционных полос в виде окружностей. Кривизна полос объясняется тем, что на краях проводников диффузионные процессы протекают более эффективно и скорость восстановления окисной пленки меньше. Вместе с этим, вследствие различных коэффициентов термического расширения платы и фольги происходит их деформация, которая может способствовать отслаиванию.

Дальнейшее увеличение мощности излучения приводит к заметной деструкции основы платы. В этом случае величина усилия отслаивания определяется остаточной адгезией на микроучастках, а также деформацией фольги и составляет около 5% от исходного значения.

Проведенные экспериментальные работы показали, что воздействие лазерного излучения на печатные платы сопровождается изменением адгезионной прочности фольгированных проводников. Однако данное воздействие носит локальный характер и на общую механическую прочность сцепления проводников с диэлектрическим основанием, как показали механические испытания образцов, влияния не оказывают.

#### **4. 2. Температурные режимы формирования паяных соединений**

Несмотря на многолетний опыт применения низкотемпературной пайки при монтаже ЭРЭ на печатные платы в литературе практически нет сведений относительно непосредственного измерения температурно- временных режимов в зоне пайки. Тем более это касается бесконтактного способа пайки планарных выводов ИМС на ППМ с применением лазерного излучения. Между тем сведения о условиях образования паемого соединения позволяет определить оптимальные технологические режимы пайки для получения качественного и надежного соединения. При пайке радиоэлементов на печатные платы паяльником тепловой режим задается температурой жала и временем пайки. Относительно недавно стали развиваться автоматизированные контактные и

бесконтактные способы пайки, в которых практически исключаются случайные ошибки при выборе режимов со стороны операторов. Однако при контактной пайке соединение может загрязняться окислами и другими продуктами сгорания, что приводит к снижению качества и надежности паяного соединения. Этого недостатка лишен способ пайки с использованием лазерного излучения.

Температуру в зоне пайки измеряли с помощью термопар, используя принцип сравнения, при котором погрешности измерения оказываются одинаковыми для всех режимов и методов пайки. Это обстоятельство позволяет изучить закономерности изменения температуры в зоне пайки при различных режимах. Запись сигнала производили на свето-лучевом осциллографе Н-105, обладающем малой инертностью, что позволило наблюдать быстропротекающие процессы в стадиях нагрева и остывания и регистрировать фазовые переходы.

Одновременно с исследованием температурных режимов формирования паяных соединений, полученных лазерным нагревом, производили изучение процессов пайки контактными способами: пайкой ручным паяльником и полуавтоматической пайкой ИМС паяльником в виде плоского жала.

Спай хромель-алюмелевой термопары диаметром 0,35 мм из проводников толщиной 0,15 мм, устанавливался в зазор между контактной площадкой платы и плоским выводом микросхемы рис. 4. 6.

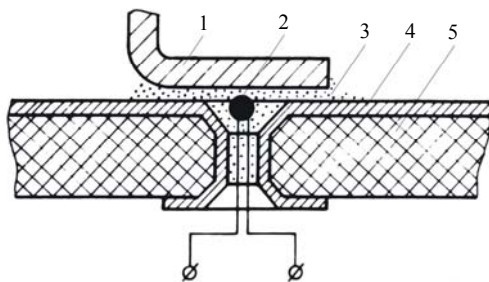


Рис. 4. 6. Схема расположения термопары при измерении температуры в зоне спая:  
1 – вывод ИС, 2 – термопара, 3 – припой, 4 – контактная площадка,  
5 – диэлектрическая основа.

Для выяснения влияния теплоотвода фольгированных проводников в эксперименте было предусмотрено одновременная съемка температуры

различных спаев по нескольким каналам. Предварительно гальванометры светолучевого осциллографа калибровали по опорной температуре.

Ручная пайка ИМС на печатные платы производилась стабилизированным паяльником ТСП-ЯВ в различных температурных и временных режимах. Из анализа осциллограмм следует, что время установления температуры в зоне спая, близкой температуре жала паяльника, составляет от 0,5 до 1 с, после чего наступает стационарный температурный режим, характеризуемый тем, что подвод тепла от паяльника компенсируется теплоотводом за счет теплопроводности, конвекции, лучеиспускания (рис. 4. 7).

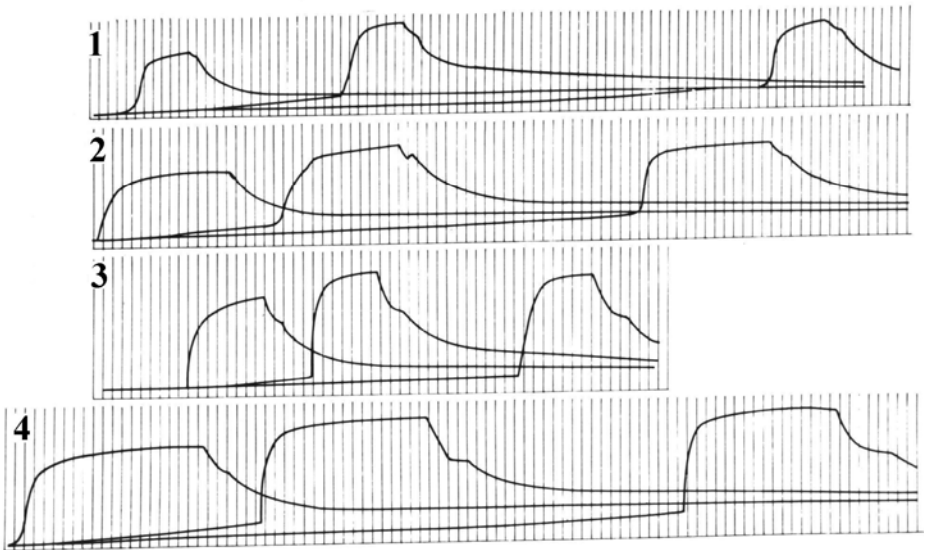


Рис. 4. 7. Температурный профиль ручной пайки паяльником:

1 –  $T_{\text{п}}=300^{\circ}\text{C}$ ,  $t=1,8\text{с}$ ,  $T_{\text{макс}}=275^{\circ}\text{C}$

3 –  $T_{\text{п}}=220^{\circ}\text{C}$ ,  $t=1,5\text{с}$ ,  $T_{\text{макс}}=195^{\circ}\text{C}$

2 –  $T_{\text{п}}=300^{\circ}\text{C}$ ,  $t=3,4\text{с}$ ,  $T_{\text{макс}}=285^{\circ}\text{C}$

4 –  $T_{\text{п}}=220^{\circ}\text{C}$ ,  $t=3,0\text{с}$ ,  $T_{\text{макс}}=205^{\circ}\text{C}$

При этом стационарный режим достигается только при полном контакте паяльника с выводами микросхемы. Влияние на температурный режим паяемого соединения со стороны соседних паяк оказывает неаккуратная пайка с зацепом соседнего вывода ИМС. При этом данное соединение претерпевает повторное

тепловое воздействие, что может повлиять на качество пайки. Передний и задний фронт осциллограмм показывает кинетику нагрева и остывания паяемого соединения.

Ступенчатые перепады температуры указывают на наличие фазовых переходов, при которых происходит сначала поглощение, а затем выделение скрытой теплоты плавления. Задний фронт осциллограммы имеет четко выраженный фазовый переход, и его амплитуду, соответствующую температуре  $185^{\circ}\text{C}$ , можно использовать как опорную при оценке температуры нагрева паяемого соединения.

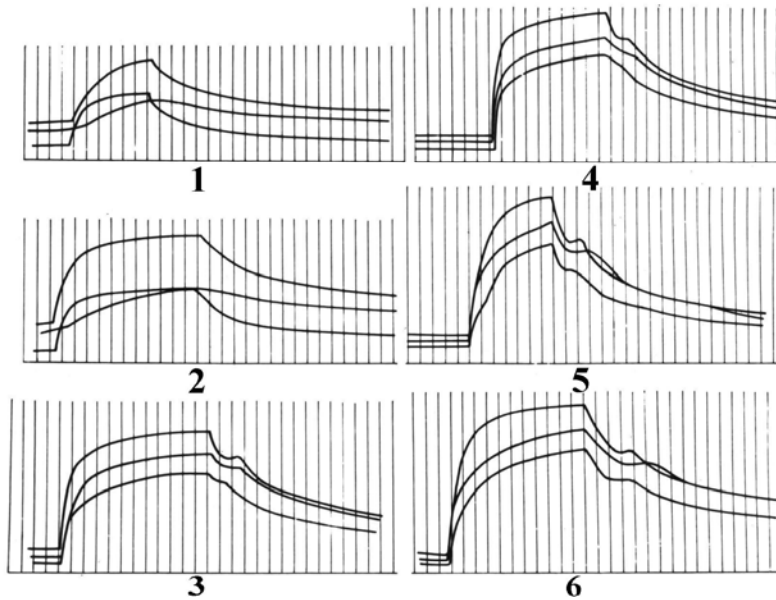


Рис. 4. 8. Температурный профиль групповой пайки паяльником:

1 –  $T_{\text{п}}=220^{\circ}\text{C}$ ,  $t=1,3\text{c}$ ,  $T_{\text{макс}}=165^{\circ}\text{C}$

4 –  $T_{\text{п}}=270^{\circ}\text{C}$ ,  $t=2,4\text{c}$ ,  $T_{\text{макс}}=245^{\circ}\text{C}$

2 –  $T_{\text{п}}=220^{\circ}\text{C}$ ,  $t=2,3\text{c}$ ,  $T_{\text{макс}}=175^{\circ}\text{C}$

5 –  $T_{\text{п}}=310^{\circ}\text{C}$ ,  $t=1,2\text{c}$ ,  $T_{\text{макс}}=265^{\circ}\text{C}$

3 –  $T_{\text{п}}=270^{\circ}\text{C}$ ,  $t=1,8\text{c}$ ,  $T_{\text{макс}}=235^{\circ}\text{C}$

6 –  $T_{\text{п}}=310^{\circ}\text{C}$ ,  $t=2,3\text{c}$ ,  $T_{\text{макс}}=270^{\circ}\text{C}$

. Групповая пайка производилась на полуавтомате групповой пайки модели ГГ2015. Режимы пайки устанавливались такими же, как и при ручной пайке, обеспечивающие недостаток, избыток и стандартное количество

тепловой энергии. Способ групповой пайки в отличие от ручной характеризуется стабильностью процесса пайки. Однако все закономерности, свойственные контактному методу пайки, остаются теми же. Кинетика изменения температуры в различных спаях микросхем для различных режимов показана на рис. 4. 8

Различные амплитуды температур нагрева спаев за вычетом индивидуальной чувствительности гальванометров светолучевого осциллографа, объясняются отличиями в теплоотдаче контактных площадок. Наличие широких проводников снижает температуру в зоне спаивания на 10 и более градусов. На осциллограммах температур спаев при контактной пайке всегда имеется излом кривой, указывающий момент снятия паяльника и начала остывания спаиваемых элементов. В результате своей упругости вывод микросхемы после снятия механического прижима, пока припой находится в жидкой фазе, занимает исходное до пайки положение. Это приводит к изменению теплоотдачи масс, участвующих в пайке и влечет за собой увеличение скорости остывания зоны спаивания.

Иллюстрацией этому факту служит крутой фронт остывания, следующий сразу после точки перегиба на осциллограмме. Максимальная температура в зоне спаивания при групповой пайке в течение 2 сек. составили 190, 245 и 280°C при соответствующей установленной температуре на паяльнике 220, 270, 310°C. Для выявления степени влияния загрязнения паяльника продуктами окисления флюса и припоя на процесс пайки были проведены опыты, в которых перед каждой пайкой производилось офлюсовывание выводов ИМС. Оказалось, что через 5 паяк температура в зоне спаивания уменьшилась на 10-20% относительно максимального уровня.

Бесконтактная пайка ИМС на печатные платы производилась с помощью непрерывного твердотельного лазера на иттрий-алюминиевом гранате с мощностью излучения до 60 Вт. Размер лазерного пятна на плате поддерживался постоянным (4 мм) во всех режимах. Необходимая для пайки энергия регулировалась выбором мощности излучения и скорости перемещения платы. Схема крепления термопар и схема измерения температуры остались такими же, что и при контактной пайке.

Тепловая модель плавления припоя излучением лазера включает несколько стадий: поглощение квантов света свободными электронами и

передача энергии электронов тепловым колебаниям решетки; нагрев объема материала в результате теплопередачи; фазовые превращения; остывание припоя после окончания воздействия излучения. Поглощение лазерного излучения происходит в соответствии с законом Бугера-Ламберта в тонком поверхностном слое толщиной  $10^{-6}$ - $10^{-5}$  см. После превращения света в тепло за счет электронной теплопроводности разогреваются внутренние слои припоя. С течением времени размер прогретой области растёт как  $\sqrt{at}$ ; где  $a$  - температуропроводность сплава.

Достигнув температуры плавления, припой смачивает поверхности вывода ИМС с контактной площадки ПП и затекает посредством капиллярных сил в зазор между выводом и площадкой. После прекращения действия лазерного излучения происходит остывание спаёв. Время остывания зависит от количества поглощенного спаём тепла, массы припоя и других компонентов, участвующих в пайке.

Перед началом пайки производился прогрев лазера в течение 15 мин. Это позволило стабилизировать излучение до уровня не хуже  $\pm 5\%$ . Скорости движения платы относительно луча составляли 5; 7,5 и 10 мм/с. Независимо от энергии накачки размер лазерного пятна устанавливался одинаковым.

Время действия излучения на спай определяется из выражения:

$$t = \frac{b + d}{u} \quad (4.1)$$

$b$ - ширина контактной площадки ПП;

$d$ - диаметр лазерного пятна;

$u$ - скорость движения печатной платы.

В результате инерционности тепловых процессов наблюдается заметное отставание нагрева в зоне контакта выводов ИМС и площадки по отношению к началу действия излучения. Вместе с этим, после прекращения действия излучения температура в зоне контакта продолжает возрастать в виду того, что поверхностный скин-слой находится в перегретом состоянии. Характерные осциллограммы зависимости температуры нагрева в зоне спаёв от времени показаны на рис. 4. 9. В отличие от контактных способов пайки на приведенных осциллограммах хорошо выражен переход из твердого состояния в жидкое.

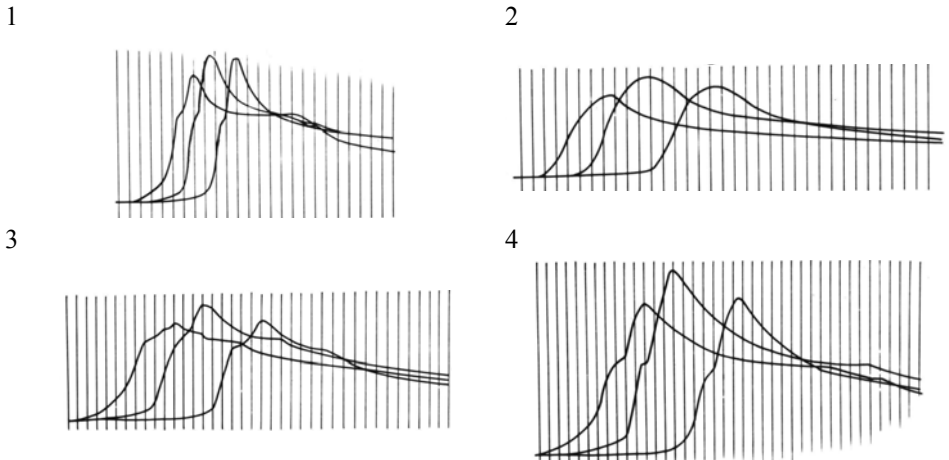


Рис. 4. 9. Температурный профиль лазерной непрерывной пайки:

1 –  $P=41$  Вт,  $V=7,5$  мм/с,  $T_{\text{макс}}=335^{\circ}\text{C}$

3 –  $P=18$  Вт,  $V=5,0$  мм/с,  $T_{\text{макс}}=265^{\circ}\text{C}$

2 –  $P=13$  Вт,  $V=5,0$  мм/с,  $T_{\text{макс}}=185^{\circ}\text{C}$

4 –  $P=29$  Вт,  $V=5,0$  мм/с,  $T_{\text{макс}}=380^{\circ}\text{C}$

Появление фазового перехода на переднем фронте обусловлено отсутствием механического контакта, а также тем, что к этому времени лазерное излучение уже выключено. Сравнивая уровни фазовых переходов на переднем и заднем фронте, они оказываются смещенными на  $5-7^{\circ}\text{C}$ . Повышение температуры переднего фазового перехода обусловлено тепловой инерционностью кристаллической решетки припоя.

На рис. 4. 10 приведен график зависимости температуры в зоне спая от величины мощности для различных скоростей движения платы.

Одной из отличительных черт лазерной пайки является воспроизводимость температурных режимов в зоне спая, что видно из рис. 4. 9.

Следует отметить, что при лазерной пайке в процессе формирования спая на этапе остывания припоя нет смещений вывода ИМС, что видно из характера поведения заднего фронта осциллограммы.

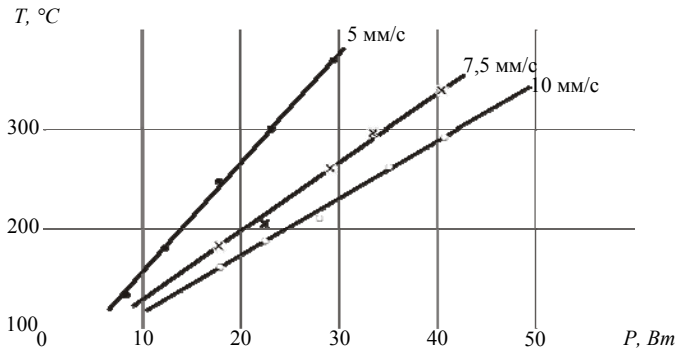


Рис. 4. 10. Зависимость температуры в зоне пайки от мощности лазерного излучения и скорости движения печатной платы.

Кроме того, в отличие от пайки паяльником, при лазерной пайке регистрируемая температура спая имеет более достоверный характер. В самом деле, при нажатии жала паяльника на выводе ИМС в зоне спая может не быть припоя, т. к. он выдавился по сторонам. Термопара в этом случае регистрирует температуру жала паяльника. Только при снятии жала паяльника с вывода ИМС, жидкий припой может затечь в зазор. В этом случае на формирование спая влияет величина перегрева жала паяльника выше температуры фазового перехода. Если величина зазора между выводом и контактной площадкой в исходном до пайки состоянии была выше допустимой, тогда могут наблюдаться случаи получения "холодных" и "скелетных" паек, в результате возврата упругого вывода в исходное положение пока припой находится в жидком состоянии.

Одновременно с измерениями температуры в зоне спая в отдельных опытах производилось измерение температуры нагрева поверхности кристалла по схеме на рис. 4. 11. Термопара была изготовлена из проводников хромель и алюмель диаметром 0,05 мм. Масса спая оказалась в сотни раз меньше массы кристалла и большого влияния на результаты измерений не оказывала. Анализ осциллограмм нагрева кристалла в различных режимах для контактной и лазерной пайки сведены в таблицу 4. 3.

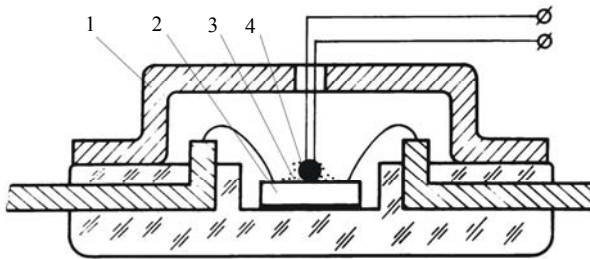


Рис. 4. 11. Схема измерения температуры на кристалле:

1 – крышка корпуса ИМС,

2 – кристалл ИМС,

3 – клей,

4 – термопара.

Характерной особенностью процесса нагревания кристалла ИМС является значительная инерционность. Температура кристалла достигает максимума через 4-6 секунд после прекращения теплового воздействия. Лазерная пайка характеризуется значительно меньшей температурой нагрева кристалла, которая достигает 75-80°C, в то время как при ручной и групповой пайке - 100-125°C.

Выполненные исследования позволили определить диапазон технологических режимов лазерной пайки, обеспечивающих плавление припоя и формирование качественных паяных соединений. Методика измерения температурных режимов, примененная при проведении исследований, обеспечила возможность получения достоверной информации о кинетике нагрева в процессе пайки различными способами. Это позволило выполнить сравнительный анализ температурных режимов формирования паяных соединений и выявить особенности, преимущества и недостатки исследованных способов нагрева.

Таким образом, лазерная пайка характеризуется более высокой скоростью нагрева паяных соединений, отсутствием контакта с зоной пайки, большей гибкостью в выборе временных и температурных режимов пайки, а также более высокой их стабильностью. Сокращение времени теплового воздействия в результате лазерного нагрева приводит к увеличению скорости охлаждения паяных соединений, следствием этого является получение мелкодисперсной структуры и повышение прочности припоя в зазоре. Снижение температуры нагрева кристаллов ИМС сокращает вероятность отказов аппаратуры.

Таблица 4. 3. Температуры поверхности кристалла интегральной схемы

| Температура поверхности кристалла, °С          |              |    |     |                 |     |                |                                  |     |    |
|------------------------------------------------|--------------|----|-----|-----------------|-----|----------------|----------------------------------|-----|----|
| <div> <div>время</div> <div>режим</div> </div> | Ручная пайка |    |     | Групповая пайка |     | Лазерная пайка |                                  |     |    |
|                                                | 1с           | 2с | 3с  | 1с              | 2с  | Ризл Вт        | Скорость перемещения стола, мм/с |     |    |
|                                                |              |    |     |                 |     |                | 5                                | 7,5 | 10 |
| 220                                            | 41           | 49 | 57  | 44              | 56  | 20             | 54                               | 46  | 34 |
| 270                                            | 55           | 71 | 93  | 55              | 74  | 30             | 63                               | 55  | 43 |
| 310                                            | 64           | 82 | 101 | 72              | 105 | 35             | 72                               | 64  | 54 |
|                                                |              |    |     |                 |     | 40             | 83                               | 76  | 67 |

В результате был сделан вывод о том, что для повышения надежности аппаратуры при создании автоматизированного сборочно-монтажного оборудования в качестве источника нагрева целесообразно применять непрерывное лазерное излучение с длиной волны 1,06 мкм.

#### **4. 3. Влияние свойств припойных паст и режимов пайки на прочностные свойства паяных соединений**

Анализ температурно-временных режимов показывает, что время пайки находится в пределах 1-3 с для ручной пайки паяльником и 0,4-1 с для пайки непрерывным лазерным излучением. Моделированием кинетики формирования соединений адгезионного типа на ЭВМ с применением модели "Растворения в зазоре с учетом граничной кинетики, а также оптимизацией режимов пайки с применением методов математического планирования эксперимента установлено, что оптимальное время пайки находится в области малых интервалов времени 0,3-0,5 с. При этом прочность паяных соединений на отрыв достигает максимального значения 1,3-1,5 КГс на один планарный вывод микросхемы типа 401. 15.

Процесс пайки осуществляется на воздухе, и в формировании паяного соединения участвуют окисленные поверхности. В этом случае следует ожидать, что при кратковременных тепловых воздействиях, когда время пайки сравнимо

со временем смачивания, существенное влияние на прочностные свойства будет оказывать активность флюса. Поэтому, для повышения прочностных свойств паяных соединений необходимо обеспечить согласование времени смачивания со временем пайки

В связи с тем, что лазерное излучение является высокоинтенсивным тепловым источником, то припойные пасты, применяемые для лазерной пайки, в первую очередь не должны образовывать углеродсодержащих остатков, приводящих к обугливанию пасты и возгоранию печатной платы. Таким образом, оптические свойства пасты должны быть согласованы с оптико-физическими свойствами лазерного излучения. Общие требования, предъявляемые к припойным пастам, были рассмотрены в разделе 3. 7 и в полной мере распространяются на пасты, используемые при лазерной пайке. В силу того, что время пайки в случае применения высокоинтенсивных тепловых источников сокращается, то необходимо произвести согласование времени смачивания со временем пайки. Для этого необходимо применять пасты, содержащие в себе флюсующие компоненты с высокой флюсующей активностью, которая может быть оценена по фактору растекаемости, или непосредственным измерением времени смачивания с помощью тензометрического менискографа.

Для определения фактора растекаемости образцы с навеской паяльной пасты помещают на зеркало расплавленного припоя, предварительно смазав нижнюю поверхность образца силиконовой смазкой. Температуру в ванне расплавленного припоя устанавливают на 50-60° выше температуры плавления испытуемого припоя. Время нагрева образцов составляет 3 сек. с момента образования жидкой фазы. После охлаждения образцов до комнатной температуры удаляют остатки флюсующей связки. Фактор растекаемости определяют по формуле:

$$\Phi = \frac{D - H}{D} \cdot 100\% \quad (4. 2)$$

где: D- диаметр эквивалентной сферы припоя;

H - высота капли растекшегося припоя.

Диаметр эквивалентной сферы припоя можно подсчитать по формуле:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot P}{\pi \gamma}} \quad (4.3)$$

где  $P$  - вес припоя,

$\gamma$  - удельный вес припоя.

Фактору растекаемости, равному 80% соответствует угол смачивания  $40-30^\circ$  и, чем больше фактор растекаемости, тем меньше угол смачивания. Минимальное допустимое значение фактора растекаемости соответствует 80%.

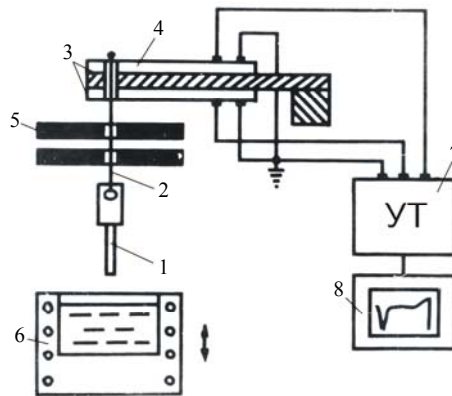


Рис. 4. 12. Схема установки для измерения времени смачивания припоем паяемых материалов

1 – исследуемый образец, 2 – нить подвеса, 3,4,5 – элементы тензодатчика  
6 – ванна с расплавленным припоем, 7 – усилитель, 8 – шлейфовый осциллограф

Измерение времени смачивания осуществляют в следующей последовательности. Исследуемый образец подвешивают к тензометрическому датчику усилий (рис. 4. 12), фиксируют начальное состояние регистрирующего прибора, поднимают ванну с расплавленным припоем до тех пор, пока образец не погрузится в припой на заданную глубину. Силы выталкивания и смачивания преобразуются датчиком в электрический сигнал, который усиливается и поступает на самописец или шлейфовый осциллограф.

Точка А (рис. 4. 13) соответствует моменту соприкосновения образца с

поверхностью расплавленного припоя, далее продолжается погружение образца в припой на заданную глубину. Точка В соответствует моменту прекращения погружения. Когда образец частично погружен в расплавленный припой, у поверхности образца, остающейся несмоченной, формируется направленный вниз мениск. На этом этапе на образец действует гидростатическая выталкивающая сила, и потеря веса равна весу вытесненного образцом припоя. Когда возникает смачивание, контактный угол уменьшается и припой поднимается вверх по боковым поверхностям образца, вызывая постепенное увеличение действующей вниз силы. В точке С начинается смачивание и мениск поднимается до тех пор, пока в точке D не достигается равновесие. Точка Е соответствует выходу ванны из-под образца. Временной интервал от А до С представляет собой время до начала смачивания. Если образец обладает малой теплопроводностью, эта часть кривой может быть потеряна, т. к. образец может быть смочен еще до того, как остановится ванна. Участок CD представляет скорость смачивания. Образцы, имеющие на поверхности растворимые в припое покрытия, дают двухэтапный процесс смачивания. Высота линии DE над нулевой линией Н (рис. 4. 13) показывает степень смачивания.

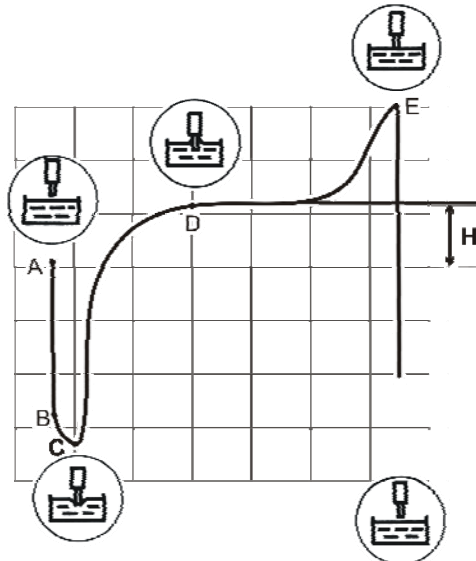


Рис. 4. 13. Диаграмма смачивания

Таким образом, изменение силы, действующей между образцом и припоем, записанная регистрирующим прибором как функция от времени позволяет оценить:

- время достижения полного смачивания;
- скорость смачивания;
- время достижения равновесного состояния;
- максимальную величину смачивания.

В начале исследований еще не существовало отечественных припойных паст, пригодных для лазерной пайки. Поэтому была выполнена разработка такой пасты совместно с ИЭС им. Е. О. Патона. В процессе работы был создан целый ряд припойных паст на основе диметилформамидата фосфорной кислоты. В качестве связующего в этих пастах был применен полиэтиленгликоль, который оптически прозрачен для лазерного излучения и при его воздействии на пасту не образуется углеродсодержащих остатков. При отработке состава припойной пасты основными критериями качества пасты являлись: степень окисленности и форма гранул порошка припоя, фактор растекаемости, способность к разбрызгиванию и образованию шариков, коррозионная и флюсующая активность, стабильность реологических свойств, дозируемость через тонкую иглу, сохранение свойств при длительном хранении, способность к отмывке остатков флюсующей связки.

форма гранул порошка припоя, фактор растекаемости, способность к разбрызгиванию и образованию шариков, коррозионная и флюсующая активность, стабильность реологических свойств, дозируемость через тонкую иглу, сохранение свойств при длительном хранении, способность к отмывке остатков флюсующей связки.

Лучшей была признана паста на основе порошка припоя ПОС-61 со сферическими гранулами диаметром 40-63 мкм, которые были получены распылением в среде азота и содержали минимальное количество оксидов на поверхности. Фактор растекаемости для данной пасты составляет 96-98%. Припойная паста имеет следующий состав:

|                                           |           |
|-------------------------------------------|-----------|
| Порошок припоя ПОС-61 .....               | 86 вес. % |
| Диметилформамидат фосфорной кислоты ..... | 3%        |

Гидрооксиполиэтилен жидкий (ПЭГ-400) ..... 8%

Гидрооксиполиэтилен кристаллический (ПЭГ-115) ..... 3%

Состав пасты был защищен патентом, на нее выпущены технические условия и Институтом электросварки им. Е. О. Патона была налажена опытная поставка. В соответствии с ТУ ИЭС 664-87 данная паста имеет индекс ПП-12344. Для лазерной пайки также пригодны пасты ПЛ-112 АУК 0. 0290 000 ТУ и ОСПП-180 АВО. 045. 990 ТУ.

Для оценки степени согласования активности флюсующих компонентов припойных паст с температурно-временными режимами лазерной пайки было выполнено исследование времени смачивания меди припоем ПОС-61. Оценивали активность флюсующих связей припойных паст 12343 ТУ ИЭС 664-87, ОСПП 180 АВО. 045. 990 ТУ в сравнении со спиртоканифольным флюсом ФКСп, широко используемом при ручной пайке паяльником.

Измерение времени смачивания производили по методике, описанной выше, с помощью тензометрического менискографа. Исследование проводили на образцах, изготовленных из медной проволоки диаметром 1мм. Половина образцов была подвергнута предварительному лужению припоем ПОС-61. После этого образцы были очищены от флюса и обезжирены. Время смачивания измеряли при трех значениях температуры припоя. Результаты измерений представлены на рис. 4. 15.

В результате исследований было установлено, что флюсующие компоненты припойной пасты 12343 ТУ ИЭС 664-87 обладают наибольшей флюсующей активностью. Степень смачивания (параметр Н рис. 4. 14) для данного флюса в интервале температур 200-260°С имеет наибольшее значение. Наименьшей степенью смачивания обладает флюс ФКСп. Время смачивания в значительной степени зависит от температуры. Особенно эта зависимость сказывается в области температуры начала плавления припоя.

Так при изменении температуры нагрева от 200° до 230° время смачивания у флюса ФКСп изменяется от 3,8 сек. до 0,8 сек. у флюсующей связки 12343 ИЭС от 1 сек. до 0,4 сек. и от 1,2 сек. до 0,6 сек. у ОСПП-180. Время смачивания по предварительно луженой поверхности практически для всех флюсов уменьшается в два раза в сравнении со временем смачивания по меди.

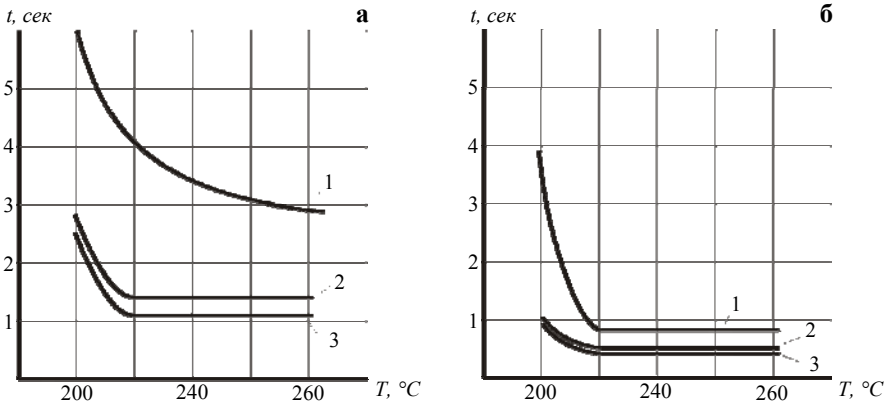


Рис. 4. 15. Зависимость времени смачивания меди припоем ПОС-61 при использовании флюсов:

1 – ФКСп, 2 – припойная паста ОСПП-180,

3 – припойная паста ПП-1233ИЭС,

а – образцы без предварительного лужения, б – предварительно луженые образцы.

Для оценки влияния флюсующей активности на прочностные свойства паяных соединений были проведены измерения усилия разрушения паяных соединений, выполненных лазерной пайкой с применением компактного припоя и флюса ФКСп, а также припойных паст 12343 ТУ ИЭС 664-87 и ОСПП-180. При этом доза припоя для всех паяных соединений была одинакова и обеспечивала формирование соединений с образованием галтелей.

Испытания паяных соединений проводили на разрывной машине фирмы "Contravers" при постоянной скорости деформирования 10 мм/мин. Образцы для испытаний на прочность паяных соединений планарных выводов с контактными площадками печатной платы соответствовали ОСТ 5. ГО. 055. 089.

Отрыв выводов в месте пайки производился под углом 90° (рис. 4. 16). Результаты сравнительных механических испытаний монтажных соединений, выполненных ручной пайкой паяльником и лазерной пайкой, представлены в табл. 4. 4.

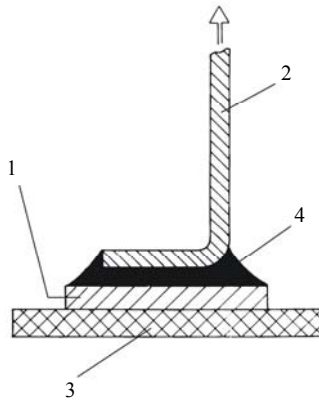


Рис. 4. 16. Испытание усилия разрушения паяного соединения

- 1 – контактная площадка,
- 2 – вывод микросхемы,
- 3 – диэлектрическая основа,
- 4 – припой,
- F – направление приложения силы.

При рассмотрении данных результатов видно, что наблюдается зависимость усилия разрушения от химической активности флюса и от времени пайки. Прочность паяных соединений возрастает с увеличением флюсующей химической активности и при сокращении времени пайки. Дальнейшему сокращению времени пайки препятствует время смачивания паяемых поверхностей. Изменение прочностных свойств паяных соединений является следствием структурных изменений, происходящих как на межфазных границах, так и в объеме переплавленного припоя. Для выявления закономерностей в процессе формирования паяных соединений были изготовлены поперечные шлифы паяных соединений и были проведены металлографические исследования с помощью растрового электронного микроскопа РЭММА-200-3.

Таблица 4. 4. Результаты механических испытаний паяных соединений.

| №<br>пп | Способ<br>пайки               | Припой,<br>флюс                       | Время<br>полного<br>смачивания, с | Режим пайки |       | Усилие<br>разруше<br>ния | Среднее кв.<br>отклонение |
|---------|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------|-------|--------------------------|---------------------------|
|         |                               |                                       |                                   | Т°,С        | t, с  |                          |                           |
| 1       | Ручная<br>пайка<br>паяльником | Припой<br>компактный,<br>флюс ФКСп    | 0,8                               | 240         | 1,5-2 | 0,37                     | ±0,22                     |
| 2       | Лазерная<br>пайка             | Припой<br>компактный,<br>флюс ФКСп    | 0,8                               | 240         | 0,8   | 0,52                     | ±0,17                     |
| 3       | Лазерная<br>пайка             | Припойная<br>паста ПЛ -<br>112        | 0,6                               | 240         | 0,5   | 1,0                      | ±0,15                     |
| 4       | Лазерная<br>пайка             | Припойная<br>паста<br>ОСПП -180       | 0,5                               | 240         | 0,5   | 1,1                      | ±0,14                     |
| 5       | Лазерная<br>пайка             | Припойная<br>паста<br>12343 ТУ<br>ИЭС | 0,4                               | 240         | 0,5   | 1,3                      | ±0,13                     |

Шлифы были изготовлены из образцов паяных соединений золоченых планарных выводов на фольгированных медных проводниках. Образцы были изготовлены ручной пайкой паяльником с использованием компактного припоя ПОС-61 и спиртоканифольного флюса ФКСп, а также лазерной пайкой с использованием припойной пасты 12343 ТУ ИЭС.

Следует отметить, что температура пайки во всех случаях была одинаковой и соответствовала  $245^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  а время пайки варьировали от минимально возможного для лазерной пайки (0,3 с) до 3 сек. при ручной пайке паяльником. На рис. 4. 17 представлены фотографии шлифов, выполненные на электронном микроскопе в различных характеристических излучениях. На всех фото в верхнем ряду слева представлен общий вид образца с указанием места съемки, внизу слева - представлена структура припоя в зазоре, отснятая в отраженных электронах (ОЭ). На остальных фото представлена структура припоя в зазоре, выполненная в характеристическом излучении: меди – (Cu), золота - (Au),

свинца - (Pb), олова - (Sn).

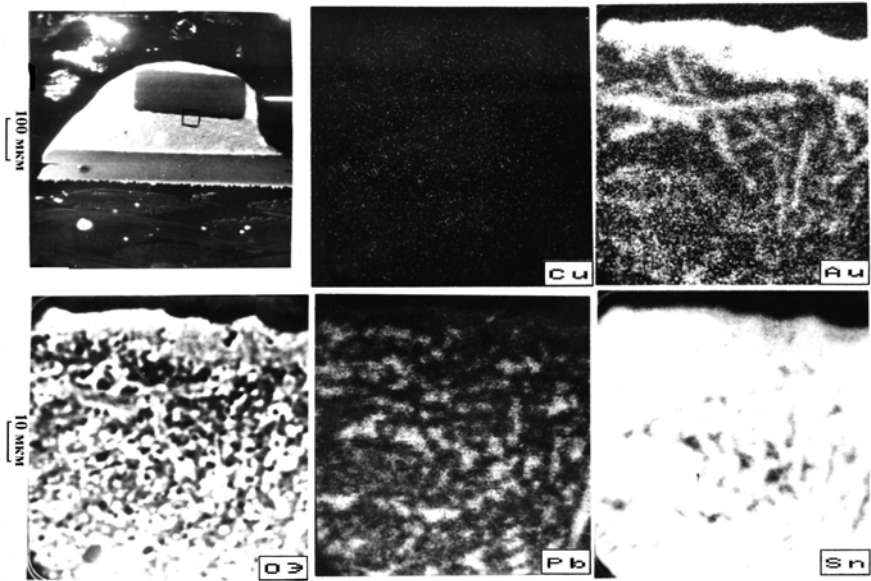


Рис. 4. 17. Шлиф паяного соединения, выполненного лазерной пайкой, флюс 2МФ,  $T = 240-250^{\circ}\text{C}$ ,  $V = 8 \text{ мм/с}$ ,  $t = 0,3 \text{ с}$

При анализе рис. 4. 17-4. 21 наблюдается четкая зависимость ширины диффузионной зоны от времени пайки, как со стороны меди, так и со стороны золота. Как видно из рис. 4. 17 при минимальном времени пайки (0,3 с.) золотое покрытие только начинает растворяться в припое и толщина слоя золота (8 мкм) еще близка к исходной - около 10 мкм. Затем с увеличением времени пайки до 0,5 с (рис. 4. 18) растворимость золота увеличивается и толщина слоя остается около 2-3 мкм.

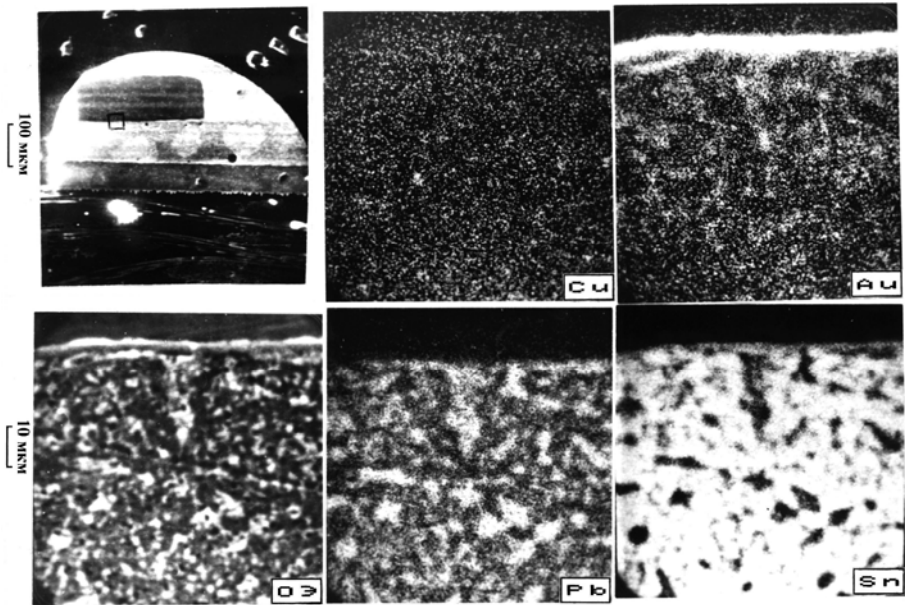


Рис. 4. 18 Шлиф паяного соединения, выполненного лазерной пайкой, флюс 2МФ,  $T = 240-250^{\circ}\text{C}$ ,  $V = 11 \text{ мм/с}$ ,  $t = 0,5 \text{ с}$

При дальнейшем увеличении времени пайки растворимость растёт, но с увеличением концентрации отрыв частичек золота замедляется, видно, что весь слой имеет рыхлую структуру, в отличие от первых двух случаев, но локализация в 10 микронной зоне еще пока сохраняется. И при времени пайки равном около 3 сек. слой золота растворяется в зазоре уже полностью и начинается образование интерметаллида олова с золотом. Из рисунков хорошо видно, как изменяется растворимость меди в зазоре с изменением времени пайки. Так, если на рис. 4. 17 частички меди в зазоре полностью отсутствуют, далее становится заметнее их наличие, а при времени пайки около 3 с. они увеличиваются в размерах, становится заметным образование глобул и наблюдается прикристаллизация меди к поверхности золоченого вывода, также как и золота к медному проводнику (рис. 4. 19, 4. 20).

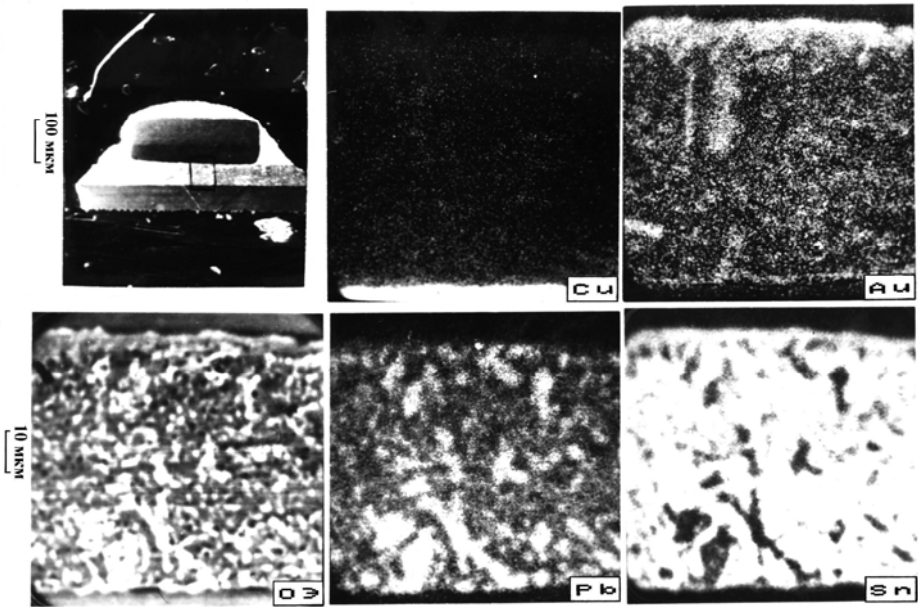


Рис. 4. 19. Шлиф паяного соединения, выполненного лазерной пайкой, флюс 2МФ,  $T = 240-250^{\circ}\text{C}$ ,  $V = 2 \text{ мм/с}$ ,  $t = 1.8 \text{ с}$

Следует также отметить, что с увеличением времени пайки наблюдается увеличение размеров зерен Sn и Pb в зазоре. Аналогичная картина наблюдается в зависимости от типа применяемого флюса. Так в паяных соединениях, выполненных ручной пайкой за время, равное 3 с. более мелкая структура зерен наблюдается при использовании более активного флюса. Получение мелкодисперсной структуры припоя в зазоре при сокращении времени пайки становится возможным из-за увеличения скорости охлаждения паяемого соединения в результате локального кратковременного нагрева и получаемого при этом высокого градиента температур на границе с ненагретыми участками печатной платы, которые во время кристаллизации припоя активно поглощают тепло.

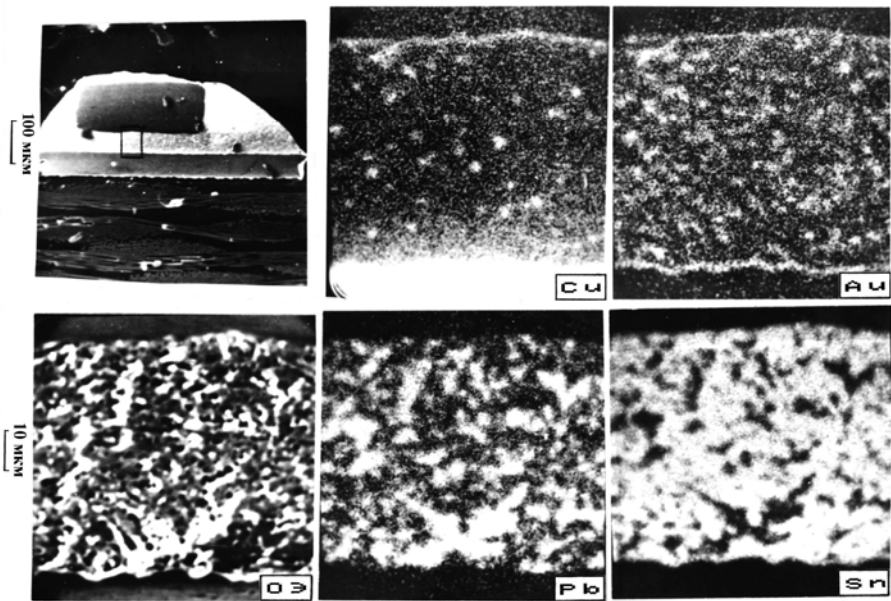


Рис. 4. 20. Шлиф паяного соединения, выполненного ручной пайкой паяльником, флюс 2МФ,  $T = 240-250^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 3 \text{ c}$

Следовательно, можно сделать вывод о том, что прочность паяных соединений в процессе лазерной пайки может быть увеличена за счет применения активного флюса и в результате сокращения времени пайки. Этим достигается подавление процессов массообмена на межфазных границах, ограничение процессов растворения золота и меди в припой и тем самым удастся предотвратить образование хрупких интерметаллидных включений, а также увеличить прочность литой структуры припоя в зазоре.

Таким образом, результаты исследований влияния режимов пайки на прочностные свойства паяных соединений, металлографические исследования полностью совпадают с результатами оптимизации режимов лазерной пайки, выполненной с применением метода статистического планирования эксперимента и с результатами численного моделирования кинетики формирования паяных соединений.

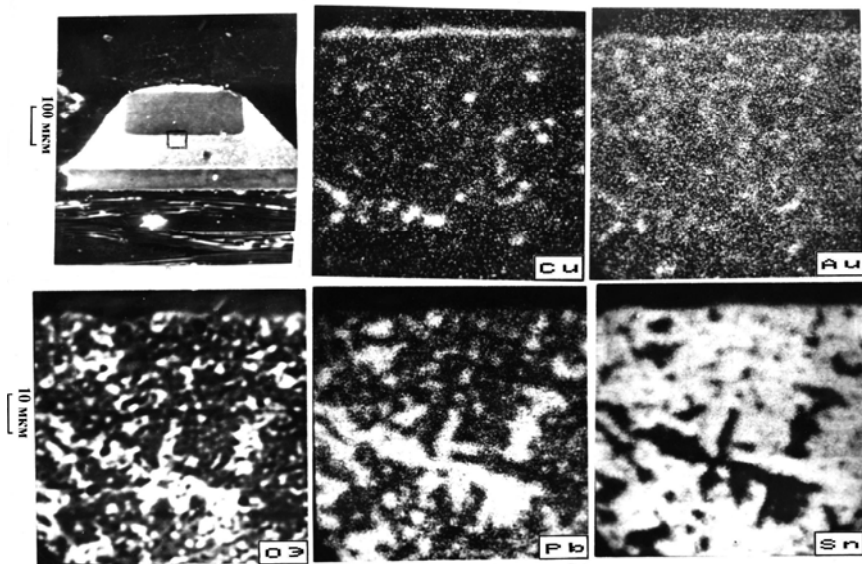


Рис. 4. 21. Шлиф паяного соединения, выполненного ручной пайкой паяльником, флюс ФКСп,  $T = 240-250^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 3 \text{ c}$

В итоге задача формирования надежных паяных соединений сводится к выбору припойной пасты, содержащей в своем составе достаточно активный флюс, сокращению времени пайки с целью подавления массообмена на межфазных границах и получению мелкодисперсной структуры припоя в зазоре в результате увеличения скорости охлаждения паяных соединений

## 5. Оборудование для автоматизированной лазерной пайки

В результате анализа литературы и экспериментальных исследований было установлено, что надежность паяных соединений в радиоэлектронной аппаратуре может быть увеличена при одновременном сокращении их размеров за счет согласования физико-химических свойств паяемых материалов и оптимизации технологических режимов пайки. Для обеспечения гарантированного качества соединений необходимо добиться предотвращения образования интерметаллидов при одновременном повышении прочности припоя в зазоре. Сопоставительным анализом технологических режимов различных методов пайки выявлен закономерный переход от контактных к бесконтактным способам нагрева с использованием лазерного излучения, отличающегося высокой интенсивностью и локальностью теплового воздействия, высокой стабильностью режимов пайки и обеспечивающее возможность сокращения времени пайки до 0,3-0,5 с. В результате высокоинтенсивного, но кратковременного и локального нагрева паяных соединений удается на 30-50°C сократить разогрев кристаллов микросхем, что предотвращает выход их из строя из-за перегрева.

Исследованиями воздействия лазерного излучения на материалы печатных плат установлено наличие оптимального согласования оптико-физических свойств диэлектрических материалов, используемых в сборочно-монтажном производстве и лазерного излучения с длиной волны 1. 06 мкм. Выявлена возможность реализации непрерывного режима пайки без применения защиты диэлектрической основы печатных плат от воздействия лазерного излучения, что обеспечивает максимальную производительность процесса пайки и способствует повышению адгезионной прочности в диапазоне режимов пайки в результате дополимеризации диэлектрической основы и испарения из нее низкомолекулярных соединений при воздействии лазерного излучения.

Выявлены предельные режимы лазерного нагрева материалов печатных плат и построены диаграммы режимов пайки, позволяющие в зависимости от мощности излучения, скорости перемещения платы и диаметра сфокусированного излучения установить оптимальные режимы лазерной пайки.

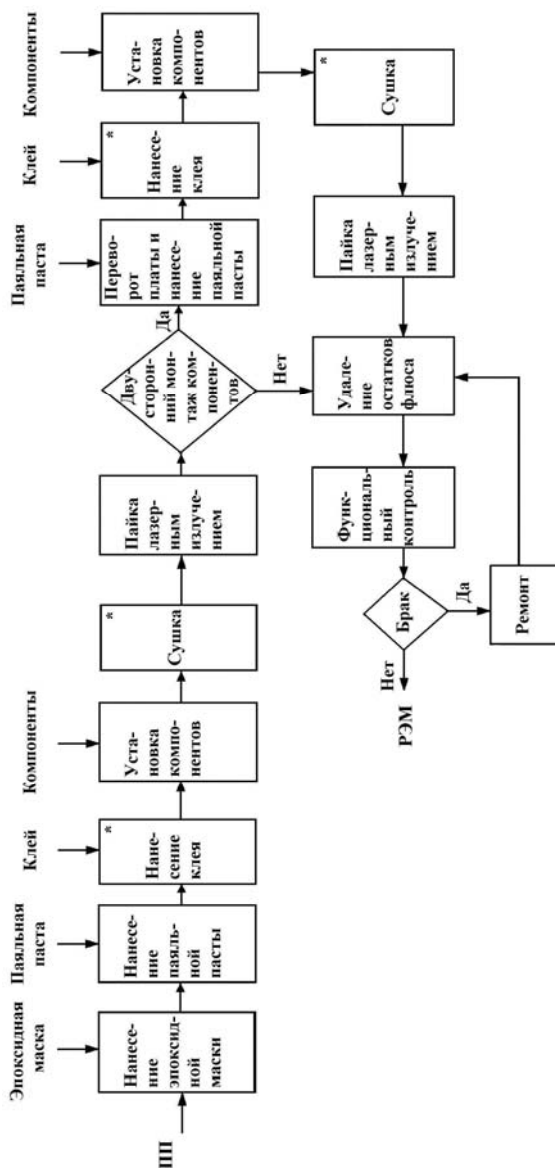


Рис.4.1. Блок-схема типового технологического процесса производства РЭМ на ППМ

На рис. 5. 1 представлена структурная схема типового технологического процесса лазерной пайки планарных выводов интегральных микросхем на платы печатного монтажа.

Технологический процесс лазерной пайки включает в себя операции: установки и приклейки компонентов на печатную плату; контроля внешнего вида и химико-физических свойств припойной пасты; подготовки и заправки дозатора припойной пасты; подготовки оснастки для крепления печатных плат, установки режимов пайки: дозирования припойной пасты, непосредственно пайки; отмывки остатков флюса; контроля качества паяных соединений.

Технические требования к технологическому оборудованию формулируются в зависимости от выполняемых оборудованием функций.

На начальном этапе автоматизации сборочно-монтажного производства РЭМ было создано оборудование только для выполнения операции дозирования припойной пасты и лазерной пайки. Все остальные операции выполнялись вручную. Поэтому оборудование в своем составе должно содержать:

- двухкоординатный стол, на котором располагается ППМ с предварительно установленными на ней ИМС;
- лазерный излучатель;
- систему оптическую комбинированную для фокусировки излучения на выводы микросхемы и наблюдения оператора за процессом пайки;
- источник питания лазера;
- дозатор припойной пасты;
- систему управления технологическим процессом.

На рис. 5. 2. представлена лазерная установка УПЛ-1, на которой производилась отработка технологии лазерной пайки с применением припойной пасты.

Экспериментальная установка разработана на базе твердотельного лазера на алюмоиттриевом гранате (YAG:Nd) - ЛТН-101 и содержит в себе следующие функциональные узлы:

- координатный стол;
- оптико-механический блок;
- пневматический дозатор паяльных паст;
- телевизионную систему наблюдения;
- пульт управления.



Рис. 5. 2. Экспериментальная установка лазерной пайки УЛП-1

Координатный стол обеспечивает перемещение печатной платы по координате  $X$  с постоянной скоростью при лазерной пайке. Скорость перемещения стола может варьироваться ступенчато и плавно в диапазоне 3-10 мм/сек. Перемещение стола по координате  $Y$  осуществляется оператором вручную дискретно с шагом, определяемым расположением фиксирующих отверстий на сменном шаблоне. Расстояние между отверстиями выполняют в соответствии с размерами между рядами паяемых выводов интегральных микросхем.

Оптико-механический блок позволяет производить фокусировку лазерного излучения и визуальное наблюдение за процессом пайки. Он включает в себя оптическую систему СОК-1 (система оптическая комбинированная) и юстировочное устройство. Юстировка производится специальными винтами в трех плоскостях таким образом, чтобы оптическая ось

лазера совпала с оптической осью системы СОК-1. Оптическая схема СОК-1 показана на рис. 4. 3. Луч лазера (1) проходит через телескопическую систему, состоящую из линз (2) и (3), поворотное зеркало (4) и фокусируется объективом (5) в круглое пятно на печатной плате. Оптический канал визуального наблюдения состоит из поворотного зеркала (7), фильтра (8), масштабной шкалы (9) и окуляра (10). Печатная плата во время пайки освещается специальным осветителем. Регулировка размера пятна, а значит и плотности потока излучения осуществляется перемещением взаимного положения линз (2) и (3) телескопа. Фокусирующий объектив позволяет регулировать размер лазерного пятна в пределах 1/6 мм для фокусного расстояния 100 мм.

Дозатор предназначен для нанесения паяльной пасты на месте пайки (Рис. 5. 3).

Дозатор состоит из следующих основных элементов:

- шприц для паяльных паст;
- электропневмоклапан;
- манометр;
- редуктор ФСРВ-337;
- реле времени типа УВПМ-1.

Варьирование величиной дозы осуществляется изменением давления воздуха в пневмосистеме и скорости перемещения координатного стола. Телевизионная установка служит для визуального наблюдения за процессами пайки и дозирования припоя на экране телевизора. Установка формирует увеличенное в 15 раз черно-белое изображение рабочей зоны на экране монитора и позволяет оператору контролировать процесс, находясь вне зоны распространения отраженного лазерного излучения. Это дает возможность практически полностью защитить оператора от вредного воздействия лазерного излучения на зрение, так как избавляет его от необходимости смотреть непосредственно в зону пайки при работе установки. Кроме того, телевизионная установка обеспечивает более удобное наблюдение за процессом по сравнению с наблюдением в окуляр системы СОК-1. Конструктивно установка состоит из отдельных блоков: телевизионной камеры, блока питания, телевизионного монитора.

На пульте управления размещены органы управления координатного стола, пневмодозатора и лазерного излучателя.



Рис. 5. 3. Пневмодозатор для дозирования паяльных паст (справа - блок управления режимами дозирования).

Технические характеристики экспериментальной установки лазерной пайки:

- габариты рабочей поверхности координатного стола, мм -260x240;
- перемещение стола:
- по координате X, мм - 250;
- по координате Y, мм - 180;
- скорость перемещения по координате X, мм/сек -  $3 \div 10$ ;
- перемещение по координате Y осуществляется вручную с фиксацией по сменному шаблону, задающему размер между рядами выводов микросхем;
- пределы перемещения фокусирующего объектива, мм - 100;
- длина волны лазерного излучения, мкм - 1, 06;
- мощность лазерного излучения, Вт  $63 \pm 20\%$ ;
- энергетическая расходимость лазерного излучения по уровню 0,5

мощности, мрад -  $10 \pm 2$ ;

- пределы регулирования диаметра лазерного пятна, мм -  $1 \div 6$ ;
  - точность дозирования пасты, % - 5;
  - объем шприца дозатора, см - 10;
  - внутренний диаметр иглы, мм -  $0,1 \div 2$ ;
  - увеличение изображения видеоконтрольным устройством –  $15^x$ ;
  - максимальная потребляемая электрическая мощность не более кв - 10;
  - давление воздуха, атм -  $1 \div 5$ ;
  - расход воды, л/мин - 4;
  - габаритные размеры: установки, мм -  $1240 \times 1110 \times 1320$ ;
  - габаритные размеры источника питания, мм -  $600 \times 600 \times 1100$ ;
- время готовности установки к работе не более 15 мин

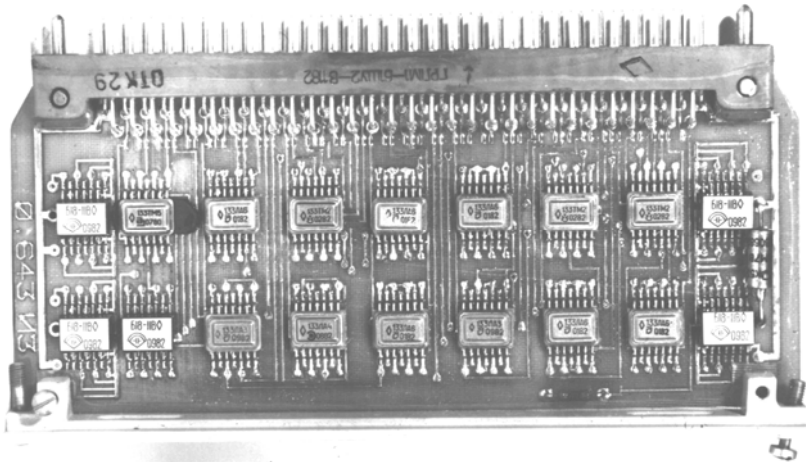


Рис. 5. 4. Модуль на ППМ, выполненный лазерной пайкой с применением припойной пасты.

На этом оборудовании была изготовлена первая опытная партия модулей радиоэлектронной аппаратуры (рис. 5. 4), которую затем подвергли механическим и климатическим испытаниям. На основании выполненных работ и представленных протоколов испытаний технология лазерной пайки электрорадиоэлементов на платах печатного монтажа паяльными пастами была внесена в ОСТ. 5. ГО. 055. 267.



Рис. 5. 5. Лазерная технологическая установка ПЛП-2

Результаты экспериментальных работ, проведенных на установке УЛП-1, были реализованы в промышленных установках ПЛП-1, ПЛП-2, ПЛП-2М и АСЛП. На рис. 5. 5 представлена установка ПЛП-2, предназначенная для выполнения лазерной пайки интегральных микросхем с планарными выводами на печатные платы. Дозирование припоя осуществлялось методом напрессовки на выводы микросхем. Перед выполнением операции пайки на этом оборудовании микросхемы предварительно должны быть установлены и зафиксированы на плате специальными приспособлениями или с помощью клея. Установка ПЛП-2М была оснащена дозатором припойной пасты. В автоматическом режиме осуществляется дозирование припойной пасты, а затем производится пайка лазерным лучом по заданной программе.

Производительность процесса пайки, с учетом выполнения операции дозирования припойной пасты, достигала 10 микросхем в минуту.

На рис. 5. 6 представлен автоматизированный комплекс "АСЛП", предназначенный для выполнения операций сборки и монтажа интегральных микросхем с планарными выводами на печатные платы в условиях мелкосерийного производства. Отличительной особенностью данного оборудования является возможность выполнения монтажа ИМС четырех типоразмеров (рис. 5. 7), наиболее часто используемых в радиоаппаратуре.



Рис. 5. 6. Лазерный технологический комплекс АСЛП

В процессе сборки и монтажа микросхем, печатная плата находится в кассете-спутнике, которая перед началом работы устанавливается на координатный стол и фиксируется электромагнитными прижимами. Комплекс выполняет шесть технологические операции в едином технологическом цикле: выбор микросхем из накопителя, дозирование клея, позиционирование микросхемы на печатную плату, дозирование припойной пасты на выводы микросхемы и их распайку лазерным излучением. Компоновка комплекса АСЛП предусматривает возможность его совместной работы с

робототехническим комплексом, который обеспечивает замену смонтированных плат и укладку их в накопитель. Производительность комплекса АСЛП составляет 90 микросхем в час.

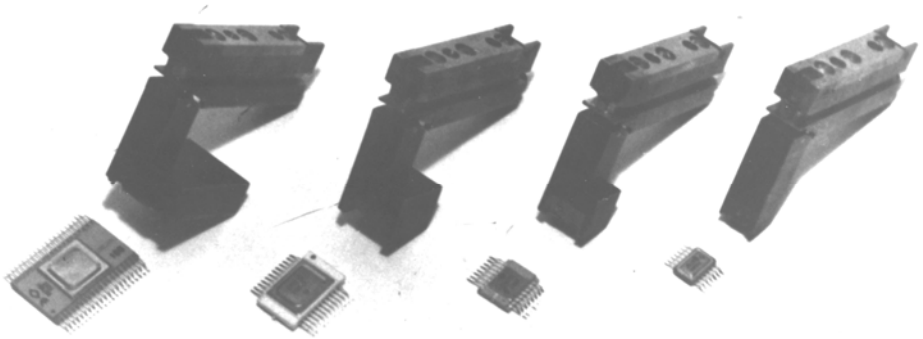


Рис. 5. 7. Вакуумные схваты для ИМС четырех типов корпусов

В период с 1984 по 1990 год приборостроительными предприятиями судостроительной промышленности было изготовлено более 40 единиц лазерного оборудования типа ПЛП-1, ПЛП-2, ПЛП-2М, АСЛП. Технический эффект от внедрения разработанной технологии и оборудования лазерной пайки состоит в повышении надежности паяных соединений, а также в повышении производительности труда в результате автоматизации сборочно-монтажных операций.

## Список использованной литературы

1. Аллас А. А. Разработка технологии лазерной пайки планарных выводов микросхем на платы печатного монтажа припойными пастами: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: – СПб. ГТУ, 1993.
2. Басин В. Е. Адгезионная прочность. – М. : Химия, 1981 г.
3. Бернштейн М. Л., Займовский В. А. Структура и механические свойства металлов. – М. : Металлургия. - 1970.
4. ГОСТ 17325-79. Пайка и лужение. Основные термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1980.
5. Гуров К. П., Карташкин Б. А., Угасте Ю. Э. Взаимная диффузия в многофазных металлических системах. – М. : Наука, 1981.
6. Долгов Ю. С., Сидокин Ю. Ф. Вопросы формирования паяного шва. – М. : Машиностроение, 1974.
7. Кузнецов О. А., Погалов А. И. Прочность паяных соединений. – М. : Машиностроение, 1987.
8. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Пайка металлов. – М. : Машиностроение, 1989.
9. Максимихин Б. А. Технологические процессы пайки электромонтажных соединений. – Л. : Энергия, 1980.
10. Манко Т. Пайка и припой. - М. : Машиностроение, – 1968.
11. Мартынов Г. К. Надежность электрических соединений, выполненных пайкой легкоплавкими припоями. – М. : Изд-во стандартов, 1968.
12. Медведев А. М. Надежность и контроль качества печатного монтажа. – М. : Радио и связь, 1986.
13. Новосадов В. С., Журавлев С. П., Кинетика процесса растворения в зазоре с учётом потока в твердую фазу / в кн. : Физика межфазных явлений. -Нальчик. Кабард. -Балкар. книжн. изд. -во, 1984. – С. 107-116.
14. ОСТ 4ГО. 055. 267. Узлы и блоки радиоэлектронной аппаратуры. Пайка монтажных соединений. ТТП.
15. Феноменологическая модель процессов массообмена на межфазной границе с учётом граничной кинетики растворения / В. С. Новосадов, К. П. Гуров, С. П. Журавлев, М. Х. Шоршоров / . Физика и химия обработки материалов. 1986. №5. С. 119-125.

16. Проектирование технологии пайки металлических изделий: Справочник.  
Лашко С. В., Лашко Н. Ф., Нагапетян И. Г. и др. – М. : Metallurgy, 1984.
17. Разработка средне- и низкотемпературных припойных паст для монтажной и конструкционной пайки изделий РЭА //Отчет о научно-исследовательской работе. – Киев. : ИЭС им. Е. О. Патона, 1985.
18. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М. : Машиностроение, 1981.
19. Новосадов В. С. Способы пайки / В кн. : Справочник по пайке/ Под ред. И. Е. Петрунина. 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2003. 480 с.
20. Хартман К., Э. Лецкий, В. Шефер. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. – М. : Мир, 1977.



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

---

## **КАФЕДРА ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

### **История кафедры**

Лазерные технологии не случайно называют технологиями XXI века. Открытые при нашей жизни лазеры уже сегодня широко проникли в медицину, биологию, экологию, промышленность, строительство, транспорт, связь, шоу-бизнес и другие сферы жизни. Лазерные принтеры, лазерные CD-диски, лазерные торговые сканеры и лазерные шоу сегодня известны всем. Менее известны широкой публике, но не менее важны лазерные технологии при лечении болезней глаз, сосудов, опухолей, в микроэлектронике для нанесения и структурирования тонких пленок, для резки и сварки брони, закалки инструментальных сталей, декоративной обработки дерева, камня и кожи, и т.д., а в ближайшей перспективе — для избавления человечества от очков и морщин (да, да — сотни операций по лазерной полировке роговицы глаза и кожи уже проведены), разработка реакций лазерного управляемого термоядерного синтеза и лазерных реактивных двигателей, создание трехмерных объектов за счет прямой трансформации виртуального (компьютерного) образа в материальный объект при взаимодействии лазерного излучения с веществом и многое, многое другое.

### **История кафедры ЛТ и ЭП делится на 3 разных периода:**

**Период I** — с момента появления лаборатории лазерной технологии в ЛИТМО в 1965 г. до момента организации кафедры охраны труда и окружающей среды (ОТ и ОС) с отраслевой лабораторией лазерных технологий (ОЛЛТ) в 1982 г.

**Период II** — период развития кафедры ОТ и ОС и ОЛЛТ — 1982-1988 гг.

**Период III** — с момента создания на базе кафедры ОТ и ОС и ОЛЛТ кафедры лазерных технологий — 1988 г., в дальнейшем преобразованной в кафедру лазерных технологий и экологического приборостроения и по настоящее время. Охарактеризуем периоды 1, 2 и 3 фактами.

1976 г. — научные работы ОЛЛТ по физическим основам лазерной обработки тонких пленок удостоены Премии Президиума АН СССР за лучшую научную работу в области «Фундаментальных проблем микроэлектроники».

1983, 1984 гг. — работы кафедры удостоены Премий Минвуза СССР за лучшую научную работу.

1986 г. — работы кафедры совместно с рядом других организаций удостоены Государственной Премии СССР.

1988 г. — кафедра ОТОС с лабораторией ЛТ по инициативе ректора ЛИТМО преобразована в выпускающую кафедру «Лазерных технологий» и начинается систематический выпуск специалистов по специальности 07.23 «лазерная техника и лазерные технологии».

1996 г. — кафедра ЛТ переименована в кафедру ЛТ и ЭП и осуществляет выпуск специалистов как лазерным технологиям, так и по специальности «инженер-педагог» со специализацией «экология».

2000 г. — лаборатория и кафедра ЛТ признаны Ведущей научной школой Российской Федерации по «Фундаментальным основам лазерных микротехнологий».

2005 г. — этот статус подтвержден.

- За период времени с 1988 по 2005 г. кафедра выпустила более 300 специалистов в области лазерных технологий;
- За тот же период времени сотрудниками и аспирантами кафедры защищены 2 докторские и более 20 кандидатских диссертаций;
- По результатам работ кафедры издано 9 монографий;
- Результаты исследований сотрудников кафедры изложены более чем в 500 научных статьях и 50 патентах и авторских свидетельствах;
- В настоящее время кафедра активно сотрудничает с университетами и институтами Германии (BIAS, FHS Emden), Китая (HUST), Франции (ENISE), Италии (Lecce University) и др.

В последние годы по приглашению различных зарубежных организаций прочтен ряд курсов лекций по лазерным технологиям.

### **Основные научные направления кафедры**

- 1). Лазерная обработка пленочных элементов.
- 2). Лазерное локальное осаждение тонких пленок.
- 3). Лазерные технологии прецизионной размерной обработки.
- 4). Создание новых оптических материалов и элементов микро- и нанооптики на базе лазерных технологий.
- 5). Лазерные технологии элементов фотоники и волоконно-оптических устройств.
- 6). Создание теории субдлинноволновых источников излучения и разработки методов изготовления и контроля ближнепольных зондов.
- 7). Лазерное медицинское оборудование и инструмент.
- 8). Фундаментальные исследования в области взаимодействия лазерного излучения с веществом: лазерная абляция и конденсация металлических и композиционных пленок и эффекты самоорганизации.
- 9). Лазерный трехмерный синтез объемных моделей.
- 10). Физико-математическое моделирование в задачах дистанционного лазерного зондирования морской среды.

Заведует кафедрой лазерных технологий и экологического приборостроения Заслуженный деятель науки России, Лауреат Государственной Премии СССР, действительный член Академии Инженерных Наук РФ, д.т.н., профессор В.П.Вейко. Среди преподавателей кафедры Почетный работник высшей школы, д.т.н., профессор Н.Б.Яковлев, д.т.н., профессор ЕА.Шахно, Почетный работник высшей школы, к.ф.-м.н., доцент Г.Д.Шандыбина, к.т.н., доцент В.В.Барановский, к.ф.-м.н., доц. Ю.И.Копилевич, к.т.н., доц. Н.И.Керро, к.ф.-м.н., доцент А.Н.Проценко, к.т.н., доцент А.А.Аллас, к.т.н., доцент Н.Н.Марковкина, к.т.н., доцент А.А. Петров.

Александр Арнольдович Аллас

Методическое пособие «Лазерная пайка в производстве радиоэлектронной аппаратуры».

Компьютерный набор и верстка

Дизайн обложки

Редакционно-издательский отдел СПб ГУ ИТМО

Зав. Отделом

Лицензия ИД № 00408 от 05. 11. 99.

Подписано в печать

Отпечатано на ризографе

Тираж 500 экз.

Андрей Аллас

Андрей Аллас

Н. Ф. Гусарова

Заказ №

**Редакционно-издательский отдел**  
Санкт-Петербургского государственного  
университета информационных технологий,  
механики и оптики



197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49