

Министерство образования и науки РФ

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»

В.А. ТУПИК

**Технология и организация производства
радиоэлектронной аппаратуры**

Учебное пособие

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
2004

Тупик В.А. Технология и организация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. 144 с.

ISBN

Содержит основные сведения о порядке разработки и проектирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), об основных технологических процессах изготовления узлов РЭА на основе технологии поверхностного монтажа компонентов, об основах организации производственных процессов изготовления радиоэлектронной продукции во времени и пространстве.

Предназначено для студентов специальности 061100 («Менеджмент организации»), 340100 («Управление качеством»), 521500 («Менеджмент»), а также может быть полезно студентам факультета радиотехники и телекоммуникаций.

Утверждено
редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

ISBN

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004

ВВЕДЕНИЕ.

Технология – наука, изучающая основные закономерности, действующие в процессе **производства**, и использующая их для получения **изделий требуемого качества**, заданного **количества** и **номенклатуры** при **минимальных материальных, энергетических и трудовых затратах**.

Конструкция – совокупность **элементов и деталей** с различными физическими свойствами и формами, находящихся в определенной пространственной, механической, тепловой, электромагнитной и энергетической **взаимосвязи**. Эта взаимосвязь определяется электрическими схемами и конструкторской документацией и обеспечивает выполнение радиоэлектронной аппаратурой (РЭА) **заданных функций** с необходимой **точностью** и **надежностью** при воздействии на нее различных факторов (производственных, эксплуатационных и др.).

Производство как технологическая система представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов, посредством которых из сырьевых ресурсов по воздействию природных сил человеком создаются необходимые продукты в виде средств производства и предметов потребления. Объектами производства являются образцы техники и продукты труда, предназначенные для непосредственного использования в сфере потребления или производства. Развитие современного производства характеризуется динамичностью (непрерывным процессом обновления материально-технической базы и методов ведения производства), усложнением цикла подготовки производства и комплексной механизацией и автоматизацией производственных процессов.

Технология производства, или **технологический процесс (ТП)** – основная часть производственного процесса, заключающаяся в выполнении определенных действий в соответствии с **технологической документацией**, направленных на изменение исходных свойств объекта производства и достижение им определенного состояния, соответствующего **конструкторской документации**.

Конструирование и технология производства, являясь отдельными частями сложного процесса разработки РЭА, в современных условиях не могут выполняться в отдельности, без учета взаимосвязей между собой и другими этапами создания новой техники. Являясь этапами общего процесса «разработка – производство – эксплуатация», конструирование и технология определяют в конечном итоге общие потребительские свойства РЭА.

Предмет дисциплины – изучение современной технологии производства одного из основных узлов РЭА: узлов на основе печатных плат (ПП), применяемых практически в любом радиоэлектронном устройстве. Название такой технологии дала конструкция узла – технология поверхностного монтажа компонентов (ТПМК).

В результате изучения дисциплины студенты должны знать физико-технологические основы процессов сборки и монтажа, контроля, регули-

ровки РЭА, методику их проектирования и оптимизации, принципы организации, построения и управления технологическими системами производства.

1. КОМПЛЕКС РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ НОВОЙ ТЕХНИКИ

Появление нового технического изделия в любой отрасли – сложный и порой противоречивый процесс. Особенно это касается радиоэлектронных изделий, функционирование которых основано на широчайшем спектре физических, химических и иных явлений. Новая техника, воплощая результаты последних научно-технических достижений, способствует развитию производительных сил общества и удовлетворению его потребностей в продукции более высокого качества, чем известные ранее прототипы или аналоги.

Важнейшим вопросом для успешных действий в сфере производства новой техники является прогнозирование. Определение главных направлений будущих исследований и разработок с целью концентрации усилий на них проводится в ходе научно-исследовательских работ (НИР) и опытно-конструкторских работ (ОКР).

Разработать и организовать производство нового изделия – значит, превратить знания, новую идею в готовый продукт. Этот процесс требует затрат времени и крупных единовременных финансовых вложений. Величина этих расходов зависит от уровня новизны продукции и частоты смены моделей. Затраты на изготовление нового изделия в первый год его выпуска могут в несколько раз превышать затраты последующих лет. Это снижает уровень эффективности производства новой техники, а иногда приводит к большим убыткам.

Быстрые темпы технического прогресса требуют такого периода смены моделей продукции, т. е. жизненного цикла продукции, при котором суммарные затраты на разработку и внедрение новых моделей, а также потери от морального износа были бы минимальны, а уровень экономической эффективности был бы максимальным.

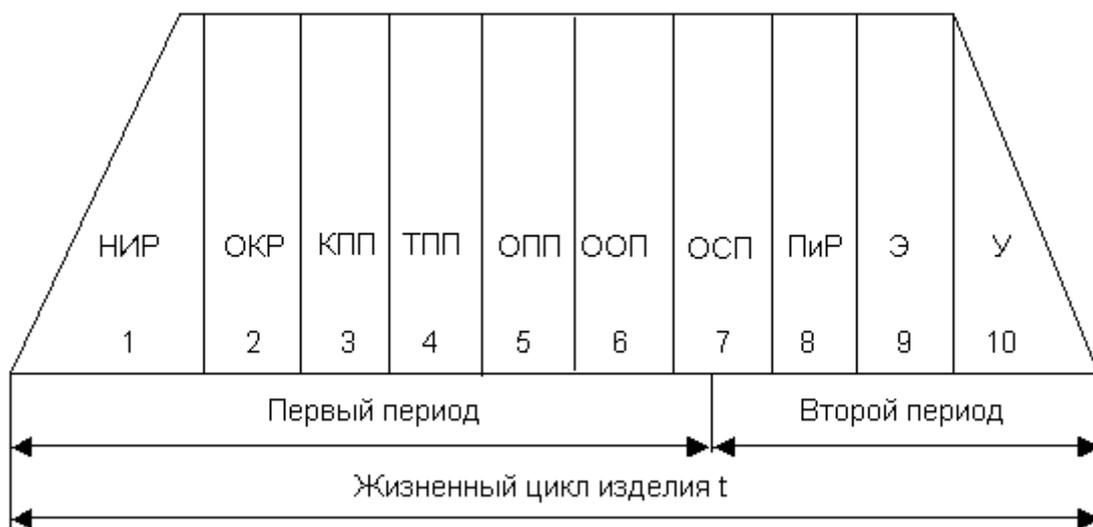


Рис. 1.1. Структура жизненного цикла изделия.

В жизненном цикле изделия (рис. 1.1) можно выделить два характерных периода: первый – это время, в течение которого осуществляется разработка новой продукции, и второй – время, в течение которого новая продукция осваивается, производится и реализуется до полного прекращения выпуска и утилизации.

В первый период жизненного цикла изделия включается полный комплекс работ по созданию новой техники:

1 – НИР. В процессе этой стадии возникают и проходят всестороннюю проверку новые идеи, реализуемые иногда в виде открытий и изобретений. Теоретические предпосылки решения научной проблемы проверяются в ходе опытно-экспериментальных работ;

2 – ОКР. Это переходная стадия от научных исследований к производству. На этой стадии идеи, возникающие в процессе НИР, практически претворяются в техническую документацию и опытные образцы;

3 – конструкторская подготовка производства (КПП): осуществляется проектирование новой техники, разрабатываются чертежи и техническая документация;

4 – технологическая подготовка производства (ТПП). Здесь разрабатываются и проверяются новые технологические процессы, проектируется и изготавливается технологическая оснастка для производства новой техники;

5 – организационная подготовка производства (ОПП). На этой стадии выбираются методы и моделируются процессы перехода на выпуск новой продукции, проводятся расчеты потребности в материалах и комплектующих изделиях, определяются календарно-плановые нормативы (продолжительность производственного цикла изготовления нового изделия, размеры партий, период чередования партий изделий и др.);

6 – отработка в опытном производстве (ООП) новой конструкции изделия. Осваивается выпуск опытного образца, проводится отладка новых технологических процессов, проверка и оценка «жизнеспособности» новой продукции.

Во второй период жизненного цикла изделия включается седьмая стадия – освоение его в промышленном производстве (ОСП). На этой стадии создаются условия для промышленного производства нового изделия. Практика показывает, что иногда и на этой стадии возникают конструкторские изменения и вызванные ими или независимые от них изменения в технологических процессах. Поэтому на стадии освоения производства возникает необходимость определения рациональной степени отработки технологической документации, целесообразного уровня оснащенности производства специальными видами оснастки и оборудования.

Стадия освоения является связующим звеном с фазой производства и реализации изделия (ПиР).

Точное соблюдение технологического процесса – одно из важнейших организационных условий повышения эффективности выпуска нового изделия, включая высокое качество продукции и высокие технико-

деля, включая высокое качество продукции и высокие технико-экономические показатели производства.

Завершающим этапом жизненного цикла является эксплуатация новой продукции (Э) – период, когда эта продукция используется в соответствии с ее назначением и приносит экономический эффект, до момента утилизации (У).

Предприятию выгодно было бы продлить второй период жизненного цикла изделия на максимальный срок, поскольку в это время оно не несет дополнительных расходов на разработку и внедрение новой продукции. Однако этот период имеет свой предел: новая продукция с момента ее появления обеспечивает социально-экономический эффект лишь до определенного времени, после которого она морально стареет и ее дальнейшее производство и использование приносят ущерб предприятию.

1.1. ОРГАНИЗАЦИЯ НИР

Развитие науки тесно взаимосвязано с техникой и производством. Производство – основная сфера применения достижений науки и техники. Результаты НИР и ОКР широко используются в производстве, а современные научные исследования все больше нуждаются в точной, сложной и дорогостоящей технике, поставляемой производством.

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, как правило, объединяют общим названием наука. Наука представляет собой систему знаний, позволяющую прогнозировать предметы и явления в природе и обществе.

На современном этапе развития общества наука превращается в непосредственную производительную силу и становится высокоэффективной отраслью, оказывая прямое воздействие на развитие техники и производства. Ускоренное развитие науки характеризуется экспоненциальным ростом объема научно-технической информации и непрерывным увеличением численности работников, занятых в этой сфере деятельности.

Научные исследования в зависимости от содержания и характера получаемых результатов делятся на фундаментальные, поисковые и прикладные.

Целью фундаментальных исследований является открытие новых явлений, закономерностей и принципов, которые могут быть использованы при создании новой техники или технологии. Результаты фундаментальных исследований, как правило, служат основой для проведения поисковых и прикладных исследований, прямо касающихся вопросов создания новых видов материалов, средств и способов производства.

Поисковые научные исследования направлены на изучение более конкретных проблем, например, возможностей создания новых материалов, техники, технологии, повышения производительности труда и качества выпускаемой продукции и т. п. Результатами поисковых исследова-

ний является научно-техническая информация, которая во многих случаях имеет материально-техническое воплощение.

При положительных результатах выводы поисковых работ имеют вполне конкретный характер и выдаются в виде отчетов, технической документации, макетов, экспериментальных образцов.

Прикладные научные исследования непосредственно направлены на создание новых конкретных изделий либо на совершенствование существующих, а также на разработку способов их производства; на разработку средств механизации и автоматизации производства, систем и методов контроля за качеством продукции и т. д. Прикладные исследования, относящиеся к материальному производству, в результате которых осуществляется техническое и рабочее проектирование, изготавливаются и испытываются опытные образцы, называются опытно-конструкторскими работами (ОКР). В процессе этих работ решаются технические задачи на основе возможностей, изысканных в результате прикладных исследований.

Цикл НИР состоит из стадий – логически обоснованных разделов, имеющих самостоятельное значение и являющихся объектом планирования и финансирования.

Первая стадия – разработка технического задания. Подбираются и изучаются научно-техническая литература, патентная и другая информация по теме. На их основе составляется аналитический обзор, и выдвигаются гипотезы. По результатам анализа выбираются направления работы и пути реализации требований, которым должно удовлетворять изделие. Определяются необходимые исполнители, подготавливается и выдается техническое задание.

Вторая стадия – проведение теоретических и экспериментальных исследований. Она состоит из нескольких этапов.

На первом этапе осуществляется теоретическая разработка темы, в процессе которой проверяются научные и технические идеи; разрабатываются методики исследований; обосновывается выбор схем; выбираются методы расчетов и исследований; выявляется необходимость проведения экспериментальных работ, разрабатываются методики их проведения.

На втором этапе проводится макетирование, осуществляются проектирование и изготовление экспериментального образца будущего изделия.

На третьем этапе проводятся стендовые и полевые экспериментальные испытания образца по разработанным программам и методикам, анализируются результаты испытаний, определяется степень соответствия полученных данных на экспериментальном образце расчетным и теоретическим выводам.

На третьей стадии – оформление результатов НИР – составляется отчетная документация, включающая материалы по новизне и целесообразности использования результатов НИР, по экономической эффективности. Если получены положительные результаты, то разрабатываются

научно-техническая документация и проект технического задания на ОКР. Составленный и оформленный комплект научно-технической документации предъявляются к приемке заказчику. Если частные технические решения имеют новизну, то они оформляются через патентную службу независимо от окончания составления всей технической документации.

На этапе приемки темы проводится обсуждение и утверждение результатов НИР (научно-технического отчета) и подписание акта заказчика о принятии работы.

Если получены положительные результаты и подписан акт приемки, то разработчик передает заказчику принятый комиссией экспериментальный образец нового изделия; протоколы приемочных испытаний и акты приемки опытного образца (макет) изделия; расчеты экономической эффективности использования результатов разработки; необходимую конструкторскую и технологическую документацию по изготовлению экспериментального образца. Разработчик принимает участие в проектировании и освоении нового изделия и наряду с заказчиком несет ответственность за достижение гарантированных им показателей изделия.

Комплексное проведение НИР по определенной целевой программе позволяет не только решить научно-техническую проблему, но и создать достаточный задел для более оперативного и качественного проведения опытно-конструкторских работ, конструкторской и технологической подготовки производства, а также значительно сократить объем доработок и сроки создания и освоения новой техники.

1.2. ОРГАНИЗАЦИЯ ОКР

ОКР проводятся в порядке реализации результатов НИР или непосредственно по техническому заданию на ОКР без предшествующей научно-исследовательской работы. Они осуществляются в несколько этапов.

Первый этап - технико-экономическое обоснование (ТЭО) целесообразности создания нового изделия и передачи его в серийное производство. При этом обосновываются возможности решения задач, варианты конструкторских и технологических решений. Составляется перечень работ, подлежащих исполнению, уточняется общий объем работ, затраты и сроки исполнения, определяются соисполнители. Приводятся данные, характеризующие эксплуатационную надежность изделия, степень унификации и стандартизации, соответствие его технического уровня отечественным и зарубежным достижениям науки и техники. Определяется ориентировочная стоимость опытного и серийного образцов, сумма затрат на организацию производства и эксплуатацию этой техники, ориентировочный срок начала поставки заказчику. Определяется состав технической подготовки, и назначаются ответственные исполнители по каждому виду работ.

На втором этапе уточняются данные ТЭО, выбирается оптимальный вариант построения изделия и его частей с учетом стоимости, эффектив-

ности и масштабов производства. Разрабатываются структурные, функциональные, принципиальные и другие схемы, определяются общие конструкторские и технологические решения, рассматриваются вопросы энергопитания, защищенности от внешних воздействий, ремонтпригодности и т. д. Макетируются наиболее сложные и ответственные функциональные части изделия, обосновываются и составляются заявки на разработку и освоение новых материалов и новых комплектующих изделий и др.

На третьем этапе осуществляется теоретическая и экспериментальная проверка схемных, конструкторских и технологических решений; уточняются принципиальные схемы; проверяются новые материалы, полуфабрикаты, комплектующие изделия; изготавливаются макеты, которые проходят механические и климатические испытания. На этом этапе оцениваются надежность изделия, его функциональных узлов и частей, электрические и температурные режимы, ремонтпригодность, удобство в эксплуатации. Оцениваются соответствие применяемых элементов предъявляемым требованиям, степень унификации, эффективность применяемых средств технического контроля качества. Разрабатывается рабочая документация для изготовления опытного образца.

На четвертом этапе составляется перечень элементов, подлежащих выходному контролю, и элементов, подлежащих тренировке, макетируется и компонуется сложная функциональная часть изделия. Готовая техническая документация на изготовление опытного образца сдается в отдел технической документации для размножения и передачи в производство. Опытный образец изготавливается при минимальном технологическом оснащении. Предварительные заводские испытания проводятся исполнителем при участии представителя заказчика по программе и методике, составленной разработчиком, и все это оформляется актом.

Законченные научно-технические разработки, по которым выдаются предложения об использовании, должны отвечать следующим требованиям:

- 1) новизна и перспективность предложенных научно-технических решений (в том числе мирового уровня);
- 2) экономическая эффективность нового изделия или нового технологического процесса при условии применения его в производстве;
- 3) патентоспособность и конкурентоспособность;
- 4) долговечность и эксплуатационная надежность изделия, устойчивость технологических процессов;
- 5) соответствие требованиям техники безопасности, эргономики, научной организации труда.

Предприятие-исполнитель работ предъявляет комиссии:

- опытный образец изделия, прошедший все испытания и принятый отделом технического контроля качества;
- материалы заводских испытаний;
- комплект технической документации на новый образец в соответствии со стандартами;

- технический отчет о выполнении разработки, рецензии, заключения экспертов и другие документы по требованию комиссии;
- патенты, полученные в процессе разработки изделия.

В техническом отчете также должны содержаться сведения о надежности и о параметрах экономической эффективности новой разработки (капитальных вложениях, цене изделия и других).

По всем законченным и рекомендованным для использования разработкам заказчик принимает решение о сроках и объемах освоения промышленного производства изделия. Основанием служит акт приемки опытного образца.

Предприятие-разработчик передает предприятию-заказчику:

- принятый комиссией опытный образец изделия;
- протоколы приемочных испытаний и акты приемки опытного образца и технологических процессов его изготовления;
- расчеты экономической эффективности использования результатов разработки;
- необходимую конструкторскую и технологическую документацию.

Разработчик, как правило, принимает участие в освоении нового изделия наряду с заказчиком и несет ответственность за достижение гарантированных им технико-экономических показателей.

1.3. РОЛЬ ПАТЕНТНОЙ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССЕ СОЗДАНИЯ НОВОЙ ТЕХНИКИ

Проведение НИР, ОКР и других стадий системы освоения новой техники, прогнозирование направлений исследований проводится при постоянном анализе большого объема различной информации: патентной, научно-технической, нормативной, статистической и другой.

Патентная информация – совокупность сведений о результатах научно-технической деятельности, содержащихся в описаниях, прилагаемых к заявкам на изобретение, открытие, промышленный образец или другой объект промышленной собственности, а также сведения об охранных документах и правовом статусе патентообладателей. Это первичная патентная информация. Центральный государственный патентный фонд первичной информации сосредоточен во Всероссийской патентно-технической библиотеке, он рассылает копии патентной документации по отраслевым и территориальным патентным фондам.

Патентные документы – совокупность публикуемых и непубликуемых документов (и извлечений из них), содержащих сведения о результатах научно-технической деятельности, заявленных и (или) признанных открытием, изобретением, полезными моделями, промышленными образцами и другими объектами промышленной собственности, а также сведения о правах изобретателей, патентообладателей, владельцев дипломов на открытия и свидетельств о регистрации полезных моделей.

Патентный фонд – это систематизированное собрание оригина-

лов патентных документов (описания с сопровождающими их чертежами и расчетами, а также различные информационные издания – рефераты, аннотации, бюллетени, тематические сборники, магнитные диски, микрофильмы и др.), выданных в Российской Федерации, и копии зарубежных патентных документов.

Отраслевые патентные фонды создаются в крупных промышленных объединениях и на предприятиях, а также в крупных научных и учебных институтах, проектно-конструкторских организациях, центральных отраслевых органах научно-технической информации и содержат патентную документацию по тематике и странам, необходимую работникам данной отрасли.

Территориальные и патентные фонды создаются в межотраслевых территориальных органах научно-технической информации и предназначены для обеспечения патентной информацией предприятий и организаций данного экономического района, не располагающих своими отраслевыми патентными фондами.

Патентная информация (первичная) отличается достоверностью, новизной и практической полезностью содержащихся в ней научно-технических сведений. Это подтверждается государственной экспертизой.

Наряду с оригинальной (первичной) патентной информацией существуют различные формы более широкой вторичной патентной информации, в том числе реферативная, сигнальная, обзорная, отсылочная и библиографическая, которая создается на основе уже изданных описаний. Эти виды информации во многих случаях значительно удобнее официальных публикаций.

Патентная и научно-техническая информация на стадиях НИР и ОКР используется для следующих целей:

- 1) прогнозирования тенденции развития научного направления, объектов техники и технологий производства;
- 2) оценки технического уровня разработок путем их сопоставления с последними запатентованными объектами промышленной собственности;
- 3) проверки патентоспособности выполняемых разработок;
- 4) проверки патентной чистоты выполняемых разработок и возможности патентования их за рубежом.

Научно-техническая и патентная информация как источник оригинальных идей на стадиях конструкторской и технологической подготовки производства служит инструментом повышения унификации конструктивных и технологических решений и сокращения их ненужного дублирования.

На стадиях организационной подготовки производства, отработки нового изделия в опытном производстве и промышленного освоения производства научно-техническая информация используется для совершенствования организации и управления производством. На этих стадиях возрастают значение и объем нормативной и статистической информа-

ции.

Недостаточное уделение внимания работе с патентными и другими источниками информации вызывает неоправданные затраты времени и ресурсов, снижает эффективность системы разработки и освоения новой техники.

2. ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ РЭА

Государственными стандартами РФ определен порядок разработки и постановки на производство продукции технического назначения, в том числе и РЭА:

- техническое предложение;
- эскизный проект (ЭП);
- технический проект.

Основой для разработки является техническое задание (ТЗ), содержание которого устанавливает ГОСТ. В ТЗ излагаются назначение и область применения разрабатываемой РЭА, технические, конструктивные, эксплуатационные и экономические требования к РЭА, условия по ее хранению и транспортированию, требования по надежности, правила проведения испытаний и приемки образцов в производстве.

Стадии разработки ТЗ, технических предложений и ЭП включаются, как правило, в НИР, а стадии разработки технического проекта и технологической подготовки производства – в ОКР.

На стадии технических предложений проводится анализ существующих технических решений, патентные исследования, проработка возможных вариантов создания РЭА, выбор оптимального решения, макетирование отдельных узлов РЭА, выработка требований для последующих этапов разработки.

На стадии эскизного проектирования осуществляют конструкторскую и технологическую проработку выбранного варианта реализации РЭА; изготавливается действующий образец или серия РЭА; проводятся их испытания в объеме, достаточном для подтверждения заданных в ТЗ технических и эксплуатационных параметров; организуется разработка в полном объеме необходимой конструкторской документации, которой присваивается литера «Э»; прорабатываются основные вопросы технологии изготовления, наладки и испытания элементов, узлов, устройств и РЭА в целом.

На стадии технического проекта принимаются окончательные решения о конструктивном оформлении РЭА и составляющих ее узлов, разрабатывается полный комплект конструкторской и технологической документации, которой присваивается литера «Т», изготавливается опытная серия РЭА, проводятся испытания РЭА на соответствие заданным в ТЗ техническим и эксплуатационным требованиям. Результаты технического проектирования являются основой для разработки полного комплекта рабочей конструкторской документации, которой присваивается литера «О».

В последующем осуществляется технологическая подготовка производства, выпуск установочной серии и организация серийного (массового) выпуска РЭА.

С развитием сети INTERNET широкие возможности для создателей РЭА открывает CALS-технология (Computer-Aided of Logistics Support) – стратегия промышленности, направленная на эффективное создание, обмен, управление и использование баз данных, поддерживающих жизненный цикл создаваемого изделия.

2.1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

На всех этапах жизненного цикла РЭА сопровождает техническая документация. Состав этой документации и ее содержание регламентируются ГОСТами. В настоящее время в стране действует большое количество стандартов, которые сгруппированы в следующие комплексы:

- единая система конструкторской документации (ЕСКД);
- единая система технологической документации (ЕСТД);
- единая система программной документации (ЕСПД);
- единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП)

и др.

Основная задача стандартизации – обеспечить единую нормативно-техническую, информационную, методическую и организационную основу проектирования, производства и эксплуатации изделий. При этом обеспечивается использование единого технического языка и терминологии, взаимообмен документацией между предприятиями без ее переоформления, совершенствование организации проектных работ, возможность автоматизации разработки технической документации с унификацией машинно-ориентированных форм документов, совершенствование способов учета, хранения и изменения документации и др.

2.2. ЕСКД

Государственные стандарты, входящие в ЕСКД, устанавливают взаимосвязанные единые правила и положения по порядку разработки, оформления и обращения конструкторской документации на изделия, разрабатываемые и выпускаемые предприятиями всех отраслей промышленности.

Конструкторские документы (КД) — графические и текстовые документы, в отдельности или в совокупности определяющие состав и устройство изделия и содержащие необходимые данные для его изготовления, контроля, приемки, эксплуатации, ремонта, утилизации.

Стандартам ЕСКД присваивают обозначения по классификационному принципу. Номер стандарта составляется из цифры, присвоенной классу стандартов ЕСКД, одной цифры после точки, обозначающей классификационную группу стандартов в соответствии с табл. 2.1, числа, определяющего порядковый номер стандарта в данной группе, и двузнач-

ной цифры (после тире), указывающей год регистрации стандарта. Например, обозначение стандарта ЕСКД «ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению» имеет вид: ГОСТ 2.701-84, то есть ГОСТ – категория нормативно-технического документа (государственный стандарт), 2 – класс (стандарты ЕСКД), 7 – классификационная группа стандартов, 01 – порядковый номер стандарта в группе, 84 – год регистрации стандарта.

Таблица 2.1.

Классификационные группы стандартов в ЕСКД

Шифр группы	Содержание стандартов в группе
0	Общие положения
1	Основные положения
2	Классификация и обозначение изделий в КД
3	Общие правила выполнения чертежей
4	Правила выполнения чертежей изделий машиностроения и приборостроения
5	Правила обращения КД (учет, хранение, дублирование, внесение изменений)
6	Правила выполнения эксплуатационной и ремонтной документации
7	Правила выполнения схем
8	Правила выполнения документов строительных, судостроительных и горных дел
9	Прочие стандарты

К графическим конструкторским документам относятся:

чертеж детали – изображение детали и другие данные, необходимые для ее изготовления и контроля;

сборочный чертеж – изображение сборочных единиц и другие детали, необходимые для сборки и контроля;

электромонтажный чертеж – данные для электрического монтажа изделия;

схема – составные части изделия в виде условных изображений или обозначений и связи между ними.

К текстовым конструкторским документам относятся:

спецификация — определяет состав сборочной единицы;

ведомость покупных изделий – перечень покупных изделий, примененных в разрабатываемом изделии;

ведомость держателей подлинников – перечень организаций-хранителей подлинников примененных в изделии документов;

пояснительная записка – описание устройства и принципа действия разработанного изделия, а также обоснование разработки;

технические условия – требования к изделию, его изготовлению, контролю качества, приемке и поставке;

эксплуатационные документы – документы для использования при эксплуатации, обслуживании и ремонте изделия в процессе эксплуатации;

инструкция – указания и правила, используемые при изготовлении

изделия (сборке, регулировке, контроле и т. п.);

патентный формуляр – документ, содержащий результаты патентного поиска, осуществленного при разработке изделия. В нем содержится оценка патентоспособности, патентная чистота и технический уровень разработанного изделия, материала, процесса, метода.

В общем объеме КД, выпускаемой в процессе разработки изделий, в том числе РЭА, существенное место занимает схемная документация.

Схемы применяют при изучении принципа действия механизма, прибора, аппарата при их изготовлении, наладке и ремонте, для понимания связи между составными частями изделия без уточнения особенностей их конструкции. Схемы являются исходным базисом для последующего конструирования отдельных частей и всего изделия в целом.

При проектировании РЭА используются следующие виды схем:

структурные схемы (Э1), определяющие основной состав РЭА и ее функциональные части, их назначение и взаимосвязи. Их разрабатывают на начальных стадиях проектирования РЭА, их используют как для разработки схем других типов, так и для общего ознакомления с РЭА;

функциональные схемы (Э2), поясняющие процессы, происходящие в отдельных функциональных частях и узлах РЭА. Они являются основой для разработки принципиальных схем и применяются при наладке, ремонте и эксплуатации РЭА;

принципиальные схемы (Э3), определяющие полный состав элементов и связей между ними и дающие полное представление о принципе работы отдельных узлов и устройств РЭА. Эти схемы являются основой для разработки полного комплекта конструкторской документации на РЭА;

схемы соединений (Э4), показывающие соединения составных частей РЭА и определяющие провода, жгуты, кабели и другие соединительные изделия, а также места их присоединения и ввода. Их используют как при выпуске КД на РЭА, так и при ее ремонте и эксплуатации.

2.3. ЕСТД

Государственные стандарты, входящие в ЕСТД, устанавливают взаимосвязанные единые правила и положения по порядку разработки, оформления и обращения технологической документации, разрабатываемой и применяемой на предприятиях всех отраслей промышленности страны.

Технологические документы (ТД) – текстовые и графические документы, в отдельности или в совокупности определяющие порядок изготовления изделия, проведения процессов и содержащие необходимые данные для контроля и приемки изделий.

Так же как в ЕСКД стандартам ЕСТД присваиваются обозначения на основе классификационного принципа. Номер стандарта составляется из цифры 3, присвоенной классу стандартов ЕСТД, одной цифры после точки, обозначающей подкласс (цифра 1 для изделий машино- и приборо-

строения), одной цифры, соответствующей классификационной группе стандартов в соответствии с табл. 2.2, числа, определяющего порядковый номер стандарта в данной группе, и двузначной цифры (после тире), указывающей год регистрации стандарта. Например, обозначение стандарта «ЕСТД. Правила оформления документов контроля. Журнал контроля технологического процесса» имеет вид: ГОСТ 3.1505-75, то есть ГОСТ – категория нормативно-технического документа (государственный стандарт), 3 – класс (стандарты ЕСТД), 1 – изделие машино- или приборостроения, 5 – классификационная группа стандартов, 05 – порядковый номер стандарта в группе, 75 – год регистрации стандарта.

Таблица 2.2

Классификационные группы стандартов в ЕСТД

Шифр группы	Содержание стандартов в группе
0	Общие положения
1	Основополагающие стандарты
2	Классификация и обозначение технологических документов
3	Учет применяемости деталей и сборочных единиц в изделиях и средств технологического оснащения
4	Основное производство. Формы технологических документов и правила их оформления на процессы, специализированные по видам работ
5	Основное производство. Формы документов и правила их оформления на испытания и контроль
6	Вспомогательное производство. Формы технологических документов и правила их оформления
7	Правила заполнения технологических документов
8	Резервная
9	Информационная база

Стадии разработки ТД определяются этапами разработки КД на изделие. На конструкторском этапе «Техническое предложение» ТД не разрабатывается, на конструкторских этапах «Эскизный проект» и «Технический проект» ТД разрабатывается как «Предварительный проект». В отдельных отраслях промышленности существует «Директивная технологическая документация», предназначенная не для изготовления, а для выполнения предварительных расчетов различного рода задач (инженерно-технических, планово-экономических, организационных) в целях определения возможности размещения соответствующего заказа на том или ином предприятии.

Основные технологические документы содержат различную информацию:

- о комплектующих составных частях изделия и применяемых материалах;
- о действиях, выполняемых исполнителями при проведении технологических процессов и операций;
- о средствах технологического оснащения производства;
- о наладке средств технологического оснащения и применяемых данных по технологическим режимам;
- о расчете трудозатрат, материалов и средств технологического оснащения;

нащения;

- о технологическом маршруте изготовления и ремонте;
- о требованиях к рабочим местам, экологии окружающей среды.

Основные технологические документы используют, как правило, на рабочих местах. Вспомогательные технологические документы разрабатывают с целью улучшения и оптимизации организации работ по технологической подготовке производства. Производные технологические документы применяют для решения задач, связанных с нормированием трудозатрат, выдачей и сдачей материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий.

Выделим основные виды *технологических документов* и укажем их назначение:

маршрутная карта – описание ТП изготовления изделия по всем операциям в технологической последовательности с указанием данных об оборудовании, оснастке, материальных и трудовых нормативах;

операционная карта – описание отдельной технологической операции с указанием переходов, данных о технологическом оборудовании, оснастке, инструментах и режимах обработки;

технологическая инструкция – описание приемов работы, правил эксплуатации (наладки и настройки) средств технологического оснащения, приготовлению растворов, электролитов, смесей и др;

ведомость технологических маршрутов – сводная информация по технологическому маршруту изготовления изделия и его составных частей;

ведомость материалов – данные о заготовках, нормах расхода материалов на изделие;

комплектовочная карта – данные о деталях, сборочных единицах и материалах, входящих в комплект собираемого изделия;

ведомость технологических документов – полный состав технологических документов, применяемых при изготовлении изделия;

ведомость оснастки – полный состав технологической оснастки, применяемой при изготовлении (ремонте) изделия;

ведомость оборудования – полный состав оборудования, применяемого при изготовлении (ремонте) изделия;

паспорт технологический – комплекс процедур по выполнению технологических операций исполнителями, технологическому контролю, контролю представителями заказчика или госприемки;

журнал контроля технологического процесса – предназначен для контроля параметров технологических режимов, применяемых при выполнении операций на соответствующем оборудовании, и др.

Маршрутная карта (МК) является одним из важнейших технологических документов комплекта. Формы и правила оформления МК устанавливаются соответствующим ГОСТом (ГОСТ 3.1118-82). В МК указывается адресная информация (номер участка, рабочего места, операции), наименование операции, перечень документов, применяемых при выполнении операции, технологическое оборудование, инструменты и приспособ-

собления, применяемые материалы и нормы их расхода, нормы расхода рабочего времени на выполнение операции, требования по качеству результата операции. При составлении МК операции необходимо именовать кратко, без возможности других толкований, начиная с отглагольного существительного, например: «Установка микросхем на печатные платы», «Пайка бескорпусных микросборок на печатные платы», «Контроль качества нанесения припойной пасты». Переходы необходимо формулировать глаголами в повелительном наклонении, например: «Извлечь деталь из тары», «Закрепить разъем на плате согласно чертежу», «Проверить внешним осмотром правильность установки элементов на плате согласно чертежу», т.е. сначала обращается внимание исполнителя на главное действие, а затем на предметы, посредством которых достигается цель.

3. ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Вновь разрабатываемая РЭА должна отвечать тактико-техническим, конструктивно-технологическим, эксплуатационным, надежностным и экономическим требованиям. Эти требования относятся к электрорадиоэлементам, печатным платам, другим конструктивным элементам аппаратуры, методам сборки узлов и модулей. Оптимальное удовлетворение этим требованиям представляет собой сложную инженерную задачу. Кроме того, эти требования должны отвечать рекомендациям соответствующих государственных стандартов. К конструктивно-технологическим требованиям относятся: обеспечение функционально-узлового принципа построения конструкции РЭА, технологичность, минимальная номенклатура комплектующих изделий, ремонтпригодность, защита от несанкционированного доступа, удобный доступ к узлам и элементам, обеспечение безопасной работы оператора.

Понятие технологичности тесно связано с понятием экономичности конструкции РЭА. Наиболее технологичные конструкции, как правило, и наиболее экономичны в условиях производства. Технологичность конструкции РЭА в существенной степени определяется рациональным выбором ее структуры, которая должна разрабатываться с учетом автономного, раздельного изготовления и наладки ее основных элементов, узлов, блоков. Конструкция РЭА более технологична, если меньше регулировочных и доводочных операций приходится выполнять после ее окончательной сборки. В этом плане идеальная технологичность у РЭА, которая, будучи собранной из отдельных узлов, выполняет заданные функции сразу же после включения электропитания.

В технологичной конструкции должны максимально использоваться унифицированные, нормализованные и стандартные детали и материалы. Необходимость разработки новых материалов с улучшенными свойствами или новых технологических процессов должна быть технически и экономически обоснована. В технологичной конструкции максимально

используют взаимозаменяемость, регулируемость, контролепригодность, инструментальную доступность узлов и элементов.

Требования по надежности включают конкретные количественные характеристики: вероятность безотказной работы за определенный отрезок времени, среднее время восстановления работоспособности и другие.

К экономическим требованиям относят минимально возможные затраты времени, труда и материальных средств на разработку, изготовление и эксплуатацию РЭА; минимальную стоимость РЭА после освоения ее в производстве; минимальные затраты на эксплуатацию, обслуживание и плановые ремонты.

Снизить затраты на разработку, изготовление и освоение производства РЭА, обеспечить совместимость и преемственность аппаратурных решений при одновременном улучшении качества, увеличении надежности и срока службы позволяет использование *модульного принципа конструирования* на основе конструктивной и функциональной взаимозаменяемости составных частей конструкции – модулей.

Модульный принцип конструирования предполагает разукрупнение (разбивку, расчленение) электронной схемы РЭА на функционально и конструктивно законченные подсхемы (части), выполняющие определенные функции и снабженные элементами коммутации и механического соединения с подобными модулями и с модулями низшего уровня в изделии. Модули одного уровня объединяются между собой в РЭА на какой-либо конструктивной основе (несущей конструкции).

Конструкция современной РЭА представляет собой иерархию модулей, каждая ступень которой называется уровнем модульности. При выборе числа уровней модульности проводится типизация модулей, т. е. сокращение их разнообразия и установление таких конструкций, которые выполняли бы самые широкие функции в изделиях определенного функционального назначения. Функциональное многообразие изделий достигается использованием различного числа уровней модульности с возможностью конструктивного оформления высшего и, следовательно, самого сложного модуля в виде законченного изделия.

Выделяют четыре основных уровня модульности.

Модулем нулевого уровня является электронный компонент. В зависимости от исполнения аппаратуры модулем нулевого уровня служат электрорадиоэлементы и интегральные микросхемы (ИМ).

Модуль первого уровня представляет собой печатную плату (ПП) с установленными на ней модулями нулевого уровня и электрическим соединителем (разъемом), с помощью которого модуль подключается к другим модулям. Иначе модуль первого уровня называется сборочным узлом, в который входят оригинальные детали (ПП) и покупные изделия (электрорадиоэлементы, крепежные детали). Сборочные узлы на основе ПП являются основой самого широкого спектра изделий, относимых к РЭА.

Модуль второго уровня – блок, основным конструктивным элемен-

том которого является панель с ответными соединителями модулей первого уровня. Межблочная коммутация выполняется соединителями, расположенными по периферии панели блока. Модули первого уровня размещаются в один или несколько рядов.

Модуль третьего уровня – стойка, в которой устанавливаются блоки.

Модульный принцип конструирования предусматривает также несколько уровней коммутации.

При разработке несложной аппаратуры высшие уровни модульности отсутствуют. Полная модульность используется только в сложной аппаратуре.

Ускорение разработки и производства аппаратуры, увеличение ее серийности, снижение стоимости можно достигнуть унификацией, нормализацией и стандартизацией основных параметров и типоразмеров модулей.

В основе стандартизации модулей и их несущих конструкций лежат типовые функции, свойственные многим электронным системам. Для использования при проектировании модульного принципа конструирования разработаны ведомственные нормалы и государственные стандарты, устанавливающие термины, определения, системы типовых конструкций модульных систем.

Конструкционная система должна представлять многоуровневое семейство модулей с оптимальным составом набора, обеспечивающим функциональную полноту при построении аппаратуры определенного назначения. Все модули системы должны быть совместимы между собой по конструктивным, электрическим и эксплуатационным параметрам.

Базовым называется принцип конструирования, при котором частные конструктивные решения реализуются на основе стандартных конструкций модулей или конструкционных систем модулей (базовых конструкций), разрешенных к применению в аппаратуре определенного класса, назначения и объектов установки.

При разработке базовых конструкций должны учитываться особенности современных и, что более важно, будущих разработок. При этом частные конструктивные решения обобщаются, а основные свойства и параметры закладываются в конструкции, которые стандартизуются, поставляются и рекомендуются для широкого применения.

Базовые конструкции не должны быть полностью конструктивно завершенными, необходимо предусматривать возможность их изменения (непринципиального характера) для создания модификаций аппаратурных решений. Иерархическое построение базовых конструкций с гибкой структурой и числом уровней не более четырех является вполне достаточным для разработки РЭА любой сложности.

При стандартизации параметры конструкций объединяются в параметрические ряды, характеризующиеся совокупностью числовых значений на основе принятых градаций и диапазонов. Если в качестве параметров ряда используют геометрические размеры конструкции, то гово-

ряды не о параметрических, а о размерных рядах. Оба вида рядов получили широкое распространение.

Оптимальными с позиций стандартизации следует считать ряды, обеспечивающие наибольший экономический эффект от их использования и опережающую стандартизацию, т. е. сокращение объема работ, связанных с пересмотром стандартов и их модернизацией (опережающая стандартизация позволяет увеличить сроки действия стандартов).

3.1. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ УЗЛОВ РЭА

Технологичность – это совокупность свойств конструкции, которые проявляются в оптимальных затратах труда, средств, материалов и времени при *изготовлении, эксплуатации и ремонте* изделия. Основные показатели технологичности определяются стандартами ЕСТПП и разделяются на конструкторские и технологические. Различают технологичность всего изделия, технологичность конструкции отдельных деталей и сборочных единиц, а также технологичность конструкции по процессу изготовления. К качественным характеристикам технологичности конструкции относят взаимозаменяемость, регулируемость, контролепригодность и инструментальную доступность конструкции.

Стандарты ЕСТПП предусматривают обязательную обработку конструкций на технологичность на всех стадиях их создания, что направлено на повышение производительности труда, снижение затрат и сокращение времени на проектирование, технологическую подготовку производства, изготовление, техническое обслуживание и ремонт изделия при обеспечении необходимого качества изделия.

Выделим некоторые характерные показатели технологичности:

- *коэффициент унификации* (конструкторский показатель)

$$K_y = (E_y + D_y) / (E + D), \quad (3.1)$$

где E_y и D_y - число унифицированных сборочных единиц и деталей соответственно; E и D – общее число сборочных единиц и деталей в изделии;

- *коэффициент применимости типовых ТП* (технологический показатель)

$$K_{ТП} = T_{ТП} / T_{И}, \quad (3.2)$$

где $T_{ТП}$ - трудоемкость типовых технологических операций при изготовлении изделия, $T_{И}$ – общая трудоемкость изготовления изделия;

- *коэффициент автоматизации и механизации* (технологический показатель)

$$K_{м.а} = T_{м.а} / T_{И}, \quad (3.3)$$

где $T_{м.а}$ - трудоемкость операций, выполняемых на автоматическом или автоматизированном оборудовании.

Технологичность конструкции изделия напрямую связана с экономическими показателями производственного процесса изготовления изделия, и количественные оценки технологичности конструкции используются при сравнении различных вариантов разработки ТП изготовления из-

деляя для оптимизации ТП.

3.2. КОНСТРУКЦИЯ РЭА И УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Конструктивные характеристики нового изделия, в том числе и комплектующие детали, зависят от условий эксплуатации аппаратуры. Интенсивность воздействия климатических, механических и радиационных факторов определяют степень защиты РЭА, что влияет на ее массогабаритные, надежность и экономические показатели. По областям применения РЭА можно разделить на три большие группы: стационарную, транспортируемую и портативную (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Классификация РЭА по объектам установки.

Стационарная РЭА – это аппаратура, эксплуатируемая в различных помещениях и на открытом воздухе (РЭА 1-й 2-й групп). Условия эксплуатации и транспортирования такой аппаратуры характеризуются весьма широким диапазоном рабочих ($-50 \div +50$ °С) и предельных ($-50 \div +65$ °С) температур, влажностью до $90 \div 98$ %, вибрацией до 120 Гц при 4-6 g, наличием многократных (до 5 g) и одиночных (до 75 g) ударов, воздействием дождя до 3 мм/мин и соляного тумана с дисперсностью капель до 10 мкм и содержанием воды до 3 г/м^3 .

Транспортируемая РЭА – это аппаратура, устанавливаемая и эксплуатируемая на сухопутном, водном, воздушном транспорте и космических аппаратах (РЭА 3-, 4- 5- и 8-й групп). Специфика работы

ских аппаратах (РЭА 3-, 4- 5- и 8-й групп). Специфика работы этого вида аппаратуры предопределяет повышенное воздействие механических факторов. Каждый вид транспорта имеет собственные вибрационные характеристики. Для предупреждения повреждения такой РЭА необходимо, чтобы вся она и отдельные ее части имели собственные частоты колебаний вне диапазона частот вибрации того транспортного средства, на котором машина эксплуатируется или перевозится.

На РЭА, установленную на автомобильном транспорте, могут воздействовать вибрация частотой до 200 Гц и удары, вызванные неровной дорогой. При движении железнодорожного транспорта возможны внезапные толчки, как следствие изменения скорости движения (при маневрировании возникают удары с ускорением до 40 g). Биение колес о стыки рельсов вызывают вибрацию с частотой до 400 Гц при ускорении до 2 g. Особо жестким воздействиям подвергается конструкция РЭА, эксплуатируемая на гусеничном транспорте (танках, транспортерах, самоходной артиллерии, тракторах). Здесь вследствие «стука» гусениц частота вибраций может достигать до 7000 Гц с амплитудой $\pm 0,025$ мм. Удары, вызванные неровной дорогой, отдачей орудия при выстреле, попаданием снаряда в корпус, могут быть большой силы и сопровождаться вибрацией. Кроме того, постоянно воздействие акустического шума с уровнем до 150 дБ.

Бортовая РЭА устанавливается на самолетах, вертолетах и ракетах различного класса, управляемых снарядах, искусственных спутниках Земли (ИСЗ) и космических аппаратах. На самолетах электронная аппаратура находится, как правило, в фюзеляже. При этом на нее воздействуют вибрационные нагрузки частотой до 500 Гц с амплитудой до 10 мм и акустический шум, уровень которого достигает 150 дБ при частоте 50÷10000 Гц.

Аппаратура, устанавливаемая на борту ракет различных классов и назначения, находится в наиболее неблагоприятных условиях с точки зрения воздействия вибраций, ударов и ускорений. Вибрации ракет в полете носят очень сложный характер, определяемый совместным воздействием работающего ракетного двигателя и аэродинамических эффектов. Характер вибраций обычно беспорядочный, и поэтому она охватывает широкий диапазон частот. Частота вибраций составляет 2500 Гц при ускорениях до 20 g. Характер таких вибраций синусоидальный. В момент запуска ракеты и при ее полете на бортовую аппаратуру воздействует акустический шум, уровень которого достигает 150 дБ. Акустический шум малых ракет максимален в момент старта.

Портативная РЭА (6-я и 7-я группы) включает микрокалькуляторы, переносные ЭВМ, специализированные вычислители, находящиеся в распоряжении геолога, топографа, строителя, солдата и офицера армии и др. Сюда же можно отнести переносную радиоприемную и радиопередающую аппаратуру, небольшую медицинскую технику и т.д. Ее характеризуют небольшие габариты, малая мощность потребления, высокая надежность и сравнительно небольшая стоимость.

4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МАТЕ- РИАЛОВ

Деталь – изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций (плата, уголок, рама и т.д.).

В конструкции современной РЭА используется большое количество разнообразных металлических и неметаллических деталей, выполняющих различные функции: детали несущих конструкций РЭА, элементы управления, детали, обеспечивающие эргономические характеристики РЭА и др. Технологические методы изготовления деталей различны и требуют разнообразного технологического оборудования, оснастки и приспособлений. К таким методам относятся в первую очередь обработка материалов резанием (механообработка), литье, обработка давлением, электрохимические и электрофизические методы, обработка пластмасс.

Если трудоемкость изготовления РЭА принять за 100 %, то операции механической обработки могут составлять до 15 %, операции литья деталей – до 3 %, операции обработки давлением – до 18%, операции переработки пластмасс – до 12 %, электрофизические и электрохимические операции – до 5 %, остальное (около 50%) – сборка и монтаж. Рассмотрим в общем виде методы обработки материалов и формообразования применительно к технологии производства РЭА.

4.1. ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ

Обработка металлических и неметаллических деталей для РЭА проводится на различных металлорежущих станках, подразделяемых по степени автоматизации работы на универсальные станки, полуавтоматические, станки-автоматы, станки с числовым программным управлением, станки типа «обрабатывающий центр». Универсальные станки используют для опытного, ремонтного и мелкосерийного производств, станки-автоматы – для крупносерийного и массового производств. В серийном производстве широко применяют станки с числовым программным управлением (ЧПУ) и обрабатывающие центры.

К методам обработки деталей резанием относятся: *точение, фрезерование, шлифование, сверление, строгание, развертывание, протягивание*. Каждый вид обработки характеризуется достигаемой точностью.

Токарные станки предназначены для обработки деталей типа тел вращения, имеющих цилиндрические, конические, фасонные, сферические, винтовые поверхности, а также торцевые плоскости. Это детали типа осей, втулок, роликов лентопротяжных механизмов и т. д. В качестве заготовок таких деталей используют штучные и прутковые заготовки. Режущую кромку резца составляет клин, который имеет передний и задний углы резания для уменьшения трения по поверхности резания при точе-

нии. Чем больше эти углы, тем острее клин (резец) и тем слабее его прочность. При обработке прочных, хрупких материалов эти углы равны нулю или минимальны, а при обработке мягких материалов они составляют от 5 до 15°. Резец может перемещаться вдоль заготовки (продольная подача) или поперек (поперечная подача).

На токарных станках можно получать конические и фасонные поверхности, нарезать резьбу, растачивать отверстия большого диаметра.

Фрезерованием обрабатывают в основном плоские поверхности, пазы, уступы, фасонные поверхности и канавки, а также отрезают заготовки. Для фрезерования используют универсальные фрезерные станки: вертикально- и горизонтально-фрезерные, продольно-фрезерные; фрезерные станки с ЧПУ для обработки сложных поверхностей; обрабатывающие центры с набором различных инструментов, работающие по программе.

Инструментом для фрезерования являются фрезы: цилиндрические с прямым и винтовым зубом; торцевые, концевые и фасонные. Цилиндрические фрезы применяют для обработки плоскостей.

При расположении зубьев фрезы по винтовой линии на поверхности цилиндра обеспечивается равномерное врезание зуба в материал заготовки без удара. Вращение фрезы может осуществляться по часовой стрелке навстречу подаче заготовки (встречное фрезерование) или против часовой стрелки (попутное фрезерование). Попутное фрезерование применяется для более точной обработки заготовки.

Для отрезания заготовок или фрезерования прямоугольных канавок используют цилиндрические фрезы с различной шириной режущей поверхности. Для высокопроизводительной и точной обработки поверхностей применяют торцевые фрезы, имеющие режущие кромки на торце фрезы. Фреза, которая имеет режущие кромки и на цилиндрической, и на торцевой поверхности, называется концевой. Такая фреза универсальна, с ее помощью можно фрезеровать канавки, уступы и пр.

Обработку деталей на сверлильных станках проводят многолезвийным осевым инструментом: сверлами, зенкерами, развертками. Соответственно названию инструмента называются операции: сверление, зенкерование, развертывание. Сверлением получают отверстия в сплошном материале, рассверливанием увеличивают диаметр обрабатываемого отверстия до большего, зенкерованием повышают качество уже имеющегося отверстия, развертыванием осуществляют чистовую обработку отверстия.

В группу сверлильных станков входят вертикально-сверлильные, горизонтально-сверлильные (агрегатные), радиально-сверлильные, многошпиндельные станки. По назначению и конструкции сверла делятся на спиральные (винтовые), перовые, твердосплавные с прямыми, косыми и винтовыми канавками, сверла для глубокого и кольцевого сверления, центровочные и специальные. Изготавливают сверла из быстрорежущей стали и твердых сплавов.

Шлифование — процесс обработки металлических и неметалличе-

ских материалов абразивным инструментом, режущими элементами которого являются зерна абразивных материалов, связанных друг с другом связующим веществом. Шлифование обеспечивает высокую точность (до 5-го квалитета точности) и 7-12-й классы шероховатости поверхности.

Основными видами шлифования являются: наружное круглое, бесцентровое наружное шлифование, внутреннее и плоское шлифование.

Наружное круглое шлифование в центрах применяют для обработки цилиндрических поверхностей. Основные методы наружного круглого шлифования – шлифование с продольной и с поперечной подачей.

При шлифовании с продольной подачей шлифовальный круг совершает два движения: вращательное вокруг оси и поступательное в направлении, перпендикулярном к оси обрабатываемой детали (поперечная подача). Заготовка тоже получает два движения: вращательное вокруг своей оси и поступательное вдоль оси (продольная подача).

Поперечная подача шлифовального круга осуществляется после возвращения заготовки в исходное положение.

При шлифовании с поперечной подачей или методом врезания шлифовальный круг и обрабатываемая заготовка имеют вращательное движение. Поперечная подача осуществляется шлифовальным кругом в поперечном направлении перпендикулярно к оси заготовки. Шлифовальный круг перекрывает всю длину обрабатываемой поверхности заготовки.

Шлифовальный круг вращается с окружной скоростью 25÷30 м/с. Заготовка, установленная в центрах передней и задней бабок или на оправке, вращается с окружной скоростью 5÷100 м/мин в направлении, противоположном направлению вращения шлифовального круга.

Внутреннее шлифование проводят шлифовальными кругами, диаметр которых меньше диаметра заготовки. Внутреннее шлифование осуществляют двумя способами: шлифование отверстия во вращающейся детали и шлифование отверстия в неподвижной детали – планетарное шлифование. Первый способ применяют в основном при обработке отверстий в деталях относительно небольших размеров, имеющих форму тел вращения.

Второй способ применяют при обработке деталей, которые неудобно закреплять в патроне станка. В этом случае шлифовальный круг совершает три движения: вращательное движение вокруг своей оси, круговое (планетарное) движение вокруг отверстия заготовки и возвратно-поступательное движение (продольное). Скорость вращения вокруг оси отверстия заготовки представляет собой как бы скорость вращения заготовки. Поперечная подача при внутреннем шлифовании осуществляется движением стола станка.

Плоское шлифование является основным методом чистовой обработки плоскостей деталей. Применяют два способа плоского шлифования: периферией и торцом круга на станках с прямоугольным и круглым столом.

4.2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЛИТЬЯ

Литье – наиболее простой и дешевый метод формообразования заготовок. Основным инструментом литейного производства является форма. От качества изготовления формы и материала, из которого она изготовлена, зависит качество заготовки (отливки). Формы делятся на разовые, полупостоянные и постоянные. Разовые – на одну отливку, полупостоянные – на несколько, постоянные позволяют получить до нескольких тысяч отливок.

При конструировании литых деталей необходимо учитывать литейные свойства заливаемого металла (сплава): жидкотекучесть, кристаллизацию и усадку. От жидкотекучести во многом зависит минимальная толщина стенок отливки. Кристаллизация (застывание) сплава происходит в направлении, перпендикулярном поверхности теплоотдачи. Скорость кристаллизации меняется от максимальной у поверхности до минимальной в центре отливки, при этом происходит рост кристаллов к центру.

Усадка – свойство металлов (и их сплавов) при охлаждении уменьшаться в объеме.

Это необходимо учитывать, обеспечивая отливке плавные переходы от одной стенки к другой, радиусы скруглений, равностенность и т. п. Если этого не учесть, возможны появления трещин, раковин, перекосов стенок. В производстве РЭА широкое распространение получил способ литья под давлением.

Литье под давлением – самый производительный и экономичный способ изготовления тонкостенных деталей сложной конфигурации в серийном производстве. Формы изготавливают из металла высокой прочности, с точностью на 2-3 квалитета выше получаемого квалитета у отливки. Получаемая шероховатость отливок составляет 7-8 класс. Наиболее распространено литье под давлением сплавов на основе цинка, алюминия, магния и меди (латуни). В качестве основного оборудования используют литьевые машины, с горячей камерой прессования, с холодной вертикальной и горизонтальной камерой прессования. Тип машины характеризуется устройством прессующего механизма. В настоящее время используют машины с передачей давления на металл посредством поршня. Такие машины называют поршневыми, они бывают с горячей и с холодной камерой прессования.

Машины с горячей камерой прессования применяют для отливки деталей из цинковых сплавов. Камера прессования таких машин расположена непосредственно в расплавленном металле. Металл из раздаточной печи заливается в подогретый тигель. При работе прессующего цилиндра поршень опускается, перекрывает входное отверстие, через которое расплавленный металл поступает в полость камеры. Под давлением поршня металл поднимается и заливается в форму. Машины с горячей камерой имеют гидравлический или пневматический привод, просты по устройству, высокопроизводительны и могут быть полностью автоматизированы.

В литьевых машинах с горизонтальной камерой прессования литни-

ковая система более короткая, в таких машинах меньше потери тепла и давления при подаче расплава из камеры прессования в полость формы. Расплавленный металл заливается в горизонтальную камеру и под действием поршня запрессовывается в форму. При раскрытии формы остаток металла остается на плоскости разъема. После полного выхода поперечного стержня отливка вместе с литником и остатком выталкивается из подвижной половинки формы.

4.3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКОЙ

Холодная штамповка – высокопроизводительный, малоотходный и довольно точный метод формообразования деталей РЭА. Этим методом изготавливают каркасы, направляющие в каркасах, пластины магнитопроводов, клеммные зажимы и многие другие детали. Исходными материалами для холодной штамповки являются листы, полосы, ленты из черных и цветных металлов, неметаллических материалов (картон, резина, фибра, текстолит). Предварительно исходный материал раскраивают, размещая будущие детали с наименьшими отходами.

Операции холодной штамповки можно разбить на две основные группы: разделительные и формообразующие. К разделительным операциям относятся: отрезка, вырубка, пробивка, надрезка, просечка, зачистка, калибровка; к формообразующим – операции, в результате которых происходит изменение формы и размеров заготовки. Это гибка, вытяжка, правка (рихтовка), формовка, холодное выдавливание.

Отрезка – отделение одной части материала от другой по незамкнутому контуру. Эта операция проводится на ножницах или в штампах. Для отрезки листового материала используют гильотинные, роликовые и вибрационные ножницы. Гильотинные и роликовые ножницы с прямо поставленными ножами применяют для прямолинейной отрезки, а роликовые с наклонно поставленными ножами и вибрационные ножницы – для криволинейной резки и вырезки деталей (заготовок) с замкнутым контуром.

Отрезку металлов за исключением магния и титана марки ВТ6 толщиной более 1,5 мм проводят в холодном состоянии. Неметаллические материалы типа гетинакса, текстолита, оргстекла перед отрезкой следует нагревать в печах инфракрасного облучения; резину, фибру, картон – увлажнять.

Вырубка и пробивка предназначены для получения деталей по внешнему контуру и отверстий в детали. Основным инструментом являются штампы, которые отличаются расчетом размеров матрицы и пуансона.

4.4. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

Электрофизические и электрохимические методы применяют для

обработки труднообрабатываемых, прочных, хрупких и многих других материалов, обработка которых обычными механическими методами затруднена или невозможна. К таким материалам относятся полупроводниковые материалы, кварц, рубин, ферриты, твердые сплавы и др. В зависимости от используемого физического процесса эти методы обработки материалов условно могут быть разделены на ультразвуковые, электроэрозионные, лучевые, электрогидравлические, электрохимические.

Ультразвуковой метод обработки заключается в акустическом (механическом) воздействии на материал. Частота звука при этом лежит в диапазоне выше слышимых звуков (более 16 кГц).

Электроэрозионный метод обработки токопроводящих материалов и сплавов основан на воздействии на изделие энергии импульсов электрических разрядов. В зависимости от вида электрического разряда (искра, дуга), параметров импульсов тока, напряжения и других условий электроэрозионная обработка подразделяется на электроискровую, электроимпульсную, электроконтактную и анодно-механическую. Каждой разновидности электроэрозионной обработки свойственны определенные технологические характеристики, оборудование и область промышленного применения.

Лучевой метод обработки, к которому относится обработка лазерным, электронным и ионным лучами, используют для обработки широкого круга материалов. Они основаны на удалении (травление, испарение) материала при воздействии на него сфокусированными лучами с высокой плотностью энергии.

Электрогидравлическая обработка материалов представляет собой одну из форм механического воздействия на материал. Интенсивный электрический разряд в жидкости приводит к сильному гидравлическому удару, под воздействием которого обрабатываемый материал может деформироваться и при известных условиях разрушаться или изменять первоначальную геометрическую форму. Электрогидравлический эффект используется в промышленности преимущественно для дробления крупных материалов, очистки литья от формовочной земли и штамповки.

Электрохимические методы обработки материалов основаны на преобразовании электрической энергии в энергию химических связей, т. е. на превращении металла заготовки в легко удаляемые из зоны обработки химические соединения (анодное растворение). Электрохимическая обработка имеет две разновидности: обработка в среде проточного электролита и электроабразивная. В последнем случае происходит комбинированный электрохимический и механический съем металла.

Для обработки особо миниатюрных деталей изготовление инструмента практически неосуществимо (например, для отверстий диаметром 5...10 мкм), лучевая обработка является единственно возможной.

Лазерная и электроннолучевая обработки позволяют проводить такие операции, как резку материалов, получение фасонных поверхностей, формирование трафаретов для толстопленочной технологии, изготовление прецизионных оригиналов фотошаблонов и т. д. При этом, по-

сколькo инструментом является сфокусированный луч, вопрос об износе инструмента так же, как и об ошибках, связанных с этим износом, полностью снимается.

При обработке электронным лучом расплавление и испарение материала происходит за счет поглощения в его поверхностном слое энергии падающего электронного луча. Источником электронов является электронная пушка, основными элементами которой являются источник электронов (катод) и система формирования электронного луча (ускоряющие и фокусирующие электроды, отклоняющие магнитные катушки), называемая иногда системой электронных линз. Электронный луч весьма прост в управлении. Неудобство заключается в необходимости поддержания вакуума, поскольку электронный луч очень быстро рассеивается и поглощается молекулами газа (воздуха). Энергия электронного луча пропорциональна ускоряющему напряжению и току луча.

Лазерная обработка имеет ряд преимуществ перед электроннолучевой: не требуется создания вакуума, при котором значительно труднее управлять технологическим процессом; нет рентгеновского излучения, сопутствующего обработке электронным лучом. Лазерные установки конструктивно проще электронных пушек, в некоторых случаях лазерная обработка может осуществляться за прозрачной преградой (например, металлизация на внутренней поверхности стеклянного цилиндра). Кроме того, при обработке электронами диэлектрических материалов необходимо предпринимать специальные меры, чтобы поверхностный заряд диэлектрика за счет поглощения электронов не экранировал мишень.

Главным недостатком обработки световым лучом является отсутствие надежных методов управления движением луча по обрабатываемой поверхности, поэтому применяется точная механика для перемещения предметного столика с деталью.

5. КОМПЛЕКТУЮЩИЕ ДЕТАЛИ. КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ УСТАНОВКИ НА ПП

Известны два основных варианта конструкций узлов на ПП: первый – с использованием монтажных отверстий на ПП для установки компонентов, имеющих выводы (*традиционный монтаж*) и второй – с установкой компонентов на поверхности ПП без применения монтажных отверстий (*поверхностный монтаж*). На практике встречается несколько различных вариаций конструкций узлов, среди которых можно выделить характерные группы (рис. 5.1):

1) Тип I – на двух сторонах платы размещаются только поверхностно-монтируемые компоненты, тип пайки на обеих сторонах – оплавление дозированной нанесенной припойной пасты;

2) Тип II – с использованием на лицевой стороне поверхностно-монтируемых и выводных, устанавливаемых в отверстия, на обратной стороне размещаются только пассивные чип-компоненты, обратная сторона паяется волной припоя;

3) Тип III – на лицевой стороне – только выводные компоненты, на обратной – только пассивные чип-компоненты, вся плата паяется волной припоя.

Заметим, что представленный набор типов сборок не является исчерпывающим.

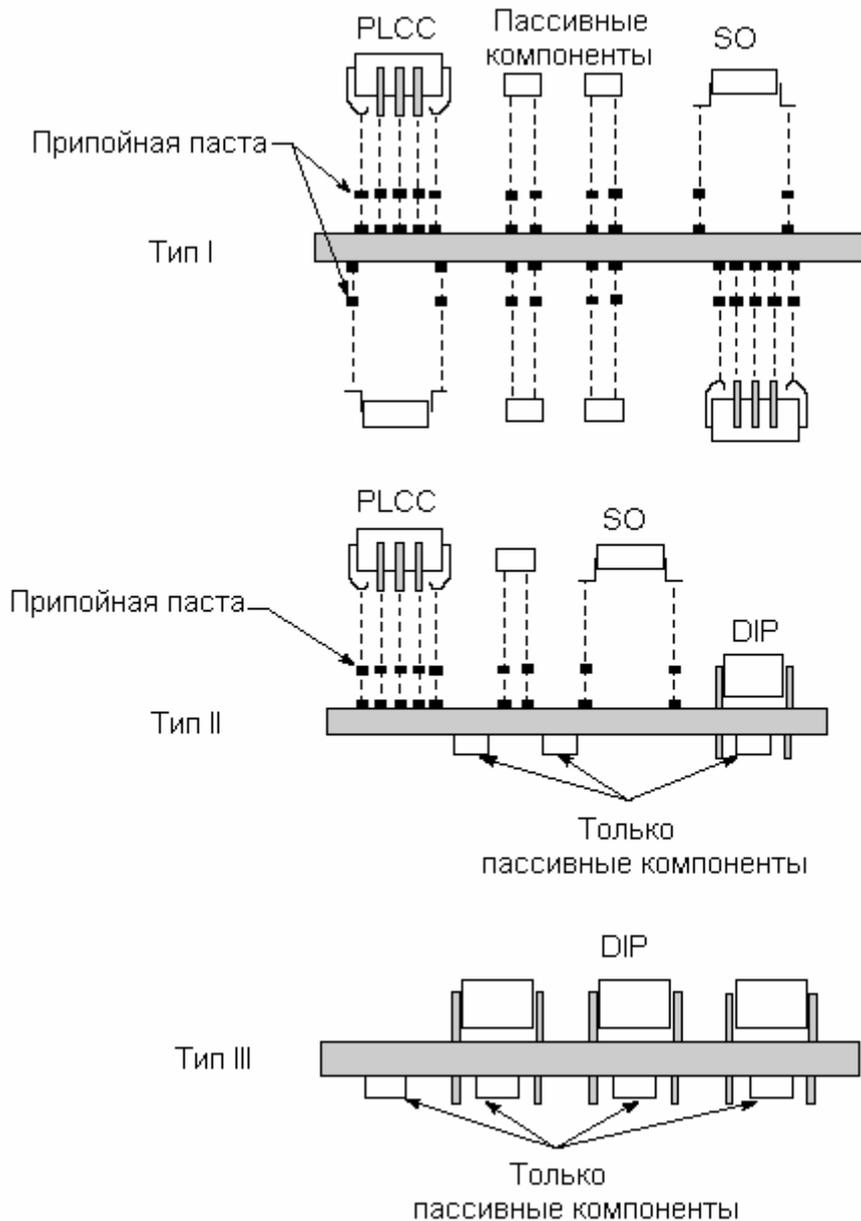


Рис. 5.1. Основные типы сборок узлов с применением поверхностно-монтажных компонентов.

В зависимости от конструкции корпуса компонента, наличия и формы выводов можно выделить три основных группы компонентов:

1). Поверхностно-монтажные компоненты (surface mount component - SMC или surface mount device - SMD). К этой группе относятся пассивные компоненты (резисторы, конденсаторы, индуктивности) в корпусах, не имеющих выводов (0805, 0603, MELF), ИМ и другие полупроводниковые приборы в базовых технологических корпусах SO, PLCC, OFP,

BGA, TAB, flip-chip, COB, DCA, а также компоненты, которые не входят во все вышеперечисленные, однако также монтируются на поверхность подложки.

2). Выводные компоненты (Pin Through Hole – PTH или Through Hole Assembly - THA). Эта группа компонентов включает традиционные пассивные и активные компоненты с осевыми (аксиальными) и радиальными выводами, а также интегральные схемы в корпусах типа DIP (Dual in-line Package).

3). Нестандартные компоненты (Odd Form Component - OFC). К этой группе компонентов относятся выводные компоненты, не вошедшие во 2 группу. Это самая пестрая группа компонентов, включающая в себя соединители, разъемы, трансформаторы, колодки, держатели, экраны и т. д. Эта группа является самой динамичной, так как усилиями производителей ряд нестандартных компонентов либо становятся поверхностно-монтируемыми, либо переходят в категорию стандартных аксиально-радиальных.

5.1. ПАССИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

Пассивные компоненты для поверхностного монтажа изготавливаются в двух модификациях: в виде цилиндра (тип MELF – Metal Electrode Face bonding) и чипа (параллелепипеда). Внешний вид чип-резистора для поверхностного монтажа приведен на рис. 5.2. Его конструкция представляет собой прямоугольный параллелепипед с металлизированными боковыми поверхностями, которые играют роль внешних выводов и используются для пайки при сборке резистора на плату. Основу резистора составляет керамическая подложка, на ее поверхность наносится методами толсто пленочной технологии резистивная пленка, которая и выполняет функции резистора.

Стандартное обозначение пассивных чип-компонентов состоит из 4 цифр, которые дают информацию о размере компонента (см. табл. 5.1): 0402 – длина компонента 4 миллидюйма, ширина 2 миллидюйма. Для большинства пассивных компонентов принята дюймовая система обозначения их корпусов.

Общемировое потребление дискретных пассивных компонентов, или чип-компонентов, достаточно быстро растет, и при текущих темпах роста очень скоро достигнет одного триллиона чип-компонентов. Из этого количества наибольшие процентные доли приходятся на автомобильную электронику (30 %), средства связи (20 %) и производство компьютерной техники (10 %).

Основная тенденция – уменьшение размеров чип-компонентов, однако прогресс в этом направлении постепенно замедляется из-за увеличения стоимости компонента с уменьшением его размера, а также из-за потери коэффициента воспроизводимости многих сборочных систем при переходе, к примеру, от чипов 0603 к 0402 или от 0402 к 0201.

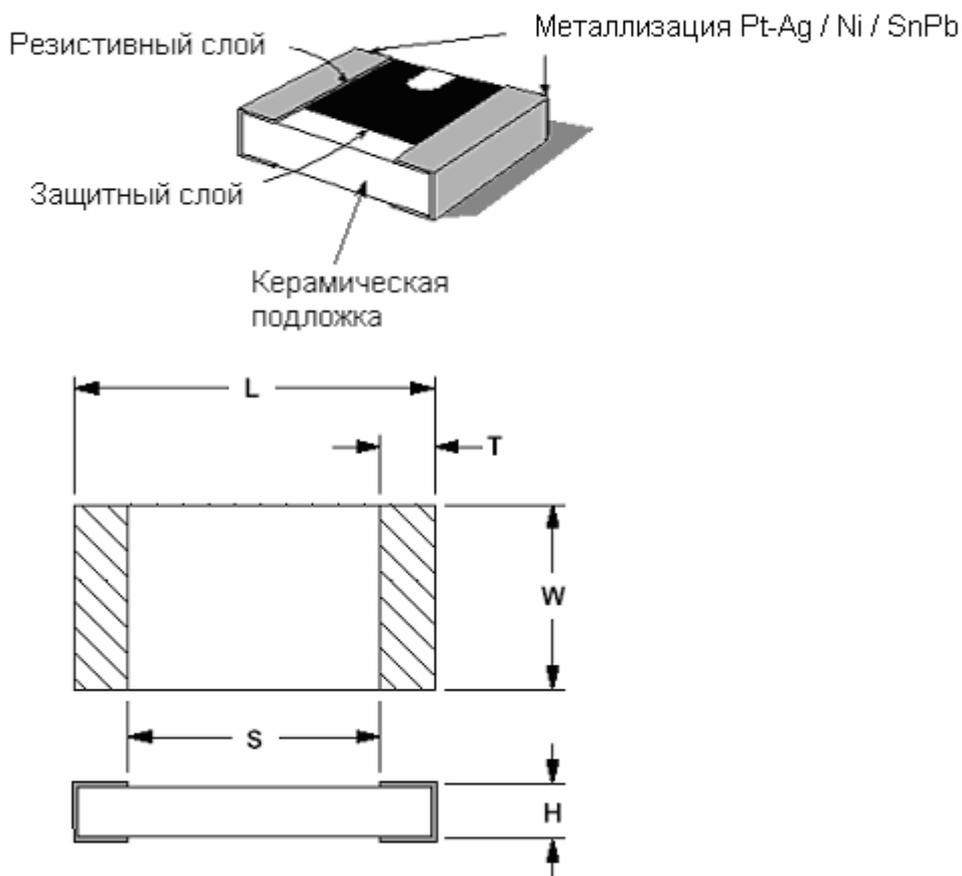


Рис. 5.2. Безвыводной чип-резистор для поверхностного монтажа. Общий вид и габариты.

Таблица 5.1

Обозначения и размеры пассивных чип-компонентов

Обозначение компонента мм (дюйм)	L (мм)		S (мм)		W (мм)		T (мм)		H (мм)
	min	max	min	max	min	max	min	max	max
1005 (0402)	1,00	1,10	0,40	0,70	0,40	0,60	0,10	0,30	0,40
1608 (0603)	1,50	1,70	0,70	1,11	0,70	0,95	0,15	0,40	0,60
2012 (0805)	1,85	2,15	1,55	1,32	1,10	1,40	0,15	0,65	0,65
3216 (1206)	3,05	3,35	1,55	2,32	1,45	1,75	0,25	0,75	0,71

В табл. 5.2 приведены основные электрические параметры чип-резисторов.

Таблица 5.2

Электрические характеристики резисторов

Тип резистора	RC0402	RC0603	RC0805	RC1206
Мощность при 70°C	0,0625 Вт	0,1 Вт	0,125 Вт	0,25 Вт
Температурный диапазон	от -55°C до +125°C			
Рабочее напряжение, max	25 В	50 В	150 В	200 В
Диапазон номиналов сопротивлений				
±1%, E-96	100 Ом .. 1 МОм		10 Ом .. 1 МОм	
±5%, E-24	2 Ом .. 3,3 МОм		1 Ом .. 10 МОм	

Температурный коэффициент сопротивления	$\pm 250 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$	$\pm 100 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
---	--	--

На рис. 5.3 приведена конструкция керамического чип-конденсатора для поверхностного монтажа. Он представляет собой структуру из чередующихся диэлектрических слоев керамики и металлических пленок, замыкающихся на боковые выводы-электроды. Внешне он мало отличается от чип-резистора, типоряд размеров у них полностью совпадает.



Рис. 5.3. Конструкция чип-конденсатора для поверхностного монтажа.

Такие керамические конденсаторы из-за их многослойной структуры восприимчивы к тепловому удару, поэтому скорость предварительного нагрева при пайке не должна превышать для них 2°C/сек. , а разница температур между конденсатором и ванной с расплавленным припоем не должна превышать 100°C .

Примерно в таком же виде изготавливаются и другие компоненты: индуктивности, танталовые конденсаторы, а также некоторые типы диодов.

Большое разнообразие видов и номиналов компонентов при небольшом различии конструкций их корпусов имеет важнейшее значение, поскольку позволяет использовать унифицированное оборудование для установки компонентов на поверхность ПП.

В этой стандартизации типов корпусов компонентов для поверхностного монтажа удалось избежать недостатков традиционной технологии, затруднявших разработку автоматизированного оборудования из-за большого разнообразия видов выводных компонентов.



Рис. 5.4. Способ упаковки компонентов для подачи на сборку.

Подача чип-компонентов на сборку осуществляется либо россыпью в специальных пеналах, либо в виде лент наподобие киноплёнки (см. рис. 5.4), имеющих различные диаметры: 100 мм, 178 мм, 330 мм. В бобине диаметром 178 мм на ленте шириной 8 мм может размещаться до 5 000 резисторов и от 3 000 до 4 000 конденсаторов. Подача чип-компонентов в сборочные линии из россыпи (из специальных кассет) снижает стоимость элементов из-за уменьшения стоимости упаковки, увеличивает плотность упаковки и снижает объем производственных отходов за счет отсутствия остатков упаковочных лент. Интегральные компоненты также могут поступать на сборку в виде лент, пеналов (россыпью) или в специальных тубусах.

5.2. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

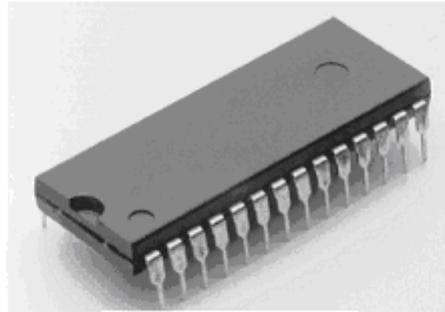
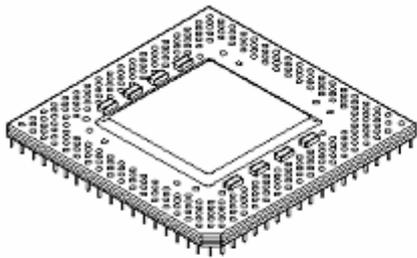
Значительно большее разнообразие типов конструкций корпусов наблюдается у микросхем. Проведем классификацию корпусов ИМ с точки зрения технологии (от этого зависит способ их установки на ПП и выбор оборудования для пайки). Можно выделить 4 типа корпусов:

- 1) с вертикальными выводами, расположенными перпендикулярно плоскости корпуса ИМ (DIP, PGA);
- 2) с плоскими выводами, выходящими параллельно корпусу ИМ (Flat Pack – SO, PLCC, QFP, TAB);
- 3) безвыводные корпуса (металлизация контактных площадок на боковых стенках корпуса - LCCC);
- 4) с шариковыми выводами на нижней плоскости корпуса (BGA – Ball Grid Array, flip-chip).

Среди различных характеристик конструкций корпусов ИМ выделим

такой показатель, как шаг вывода (рис. 5.6): расстояние между центрами соседних выводов микросхемы; это же понятие применимо к контактным площадкам на ПП, на которые эта микросхема должна припаиваться.

Конструкция корпусов ИМ *первой группы* характерна для традиционного монтажа, поскольку требует наличия на плате установочных отверстий, в которые микросхема запаивается, или так называемых «кроваток» - установочных панелей, в которые микросхема вставляется без дальнейшей пайки.

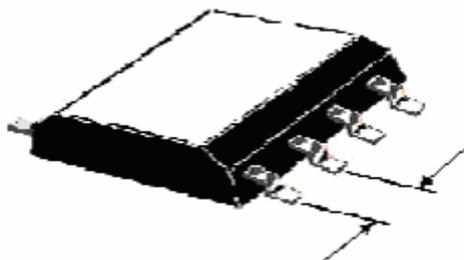


PGA - Pin Grid Array

DIP - Dual In-line Package

Рис. 5.5. Корпуса типа PGA и DIP.

Две разновидности таких корпусов – с параллельным расположением выводов на двух противоположных сторонах (DIP) и с матричными выводами на нижней плоскости корпуса (PGA – Pin Grid Array) приведены на рис. 5.5. Корпуса DIP изготавливаются с шагом выводов 2,5 мм, количество выводов от 16 до 64, масса от 1 до 12 г. Корпуса типа PGA применяются для микропроцессоров и других ИМ высокой степени интеграции. Эти ИМ, как правило, весьма дороги и устанавливаются чаще всего в «кроватки» (socket). Шаг между выводами у таких корпусов не менее 2,5 мм, количество выводов варьируется от 68 до 387. При большом количестве выводов такие микросхемы имеют довольно высокие массогабаритные показатели (масса до 84 г, размеры до 66х66 мм). На корпусе PGA могут также располагаться пассивные чип-компоненты для развязки электрических цепей (см. рис. 5.5).



Шаг выводов компонента

Рис. 5.6. Корпус типа SO, иллюстрация шага выводов компонента.

Корпуса типа PGA изготавливаются из керамики или пластмассы и для микропроцессоров используются как правило с принудительным внешним охлаждением (на верхней крышке устанавливается вентилятор). Такие меры позволяют обеспечить нормальный тепловой режим для полупроводниковых кристаллов больших размеров, поскольку отвод теп-

ла для них является серьезной конструктивной проблемой.

Вторая группа корпусов – самая распространенная, имеет большое разнообразие подвидов. Отметим две разновидности внутри этой группы.

2.1) собственно FP – прямоугольная или квадратная (QFP) плоская упаковка (рис. 5.7). Выводы расположены с двух или четырех сторон. Простейший корпус – SO (от английского Small Outline – короткие выводы, рис. 5.6). Форма выводов имеет некоторое разнообразие – «крыло чайки», J-тип, утонченные и др. Количество выводов у одного корпуса – от 6 до 304. Шаг выводов – от 1,27 мм до 0,25 мм (сверхмалый шаг), габариты корпуса на плате (длина и ширина) – от 5x5 мм (32 вывода при шаге 0,5 мм) до 40x40 мм (304 вывода, шаг 0,5 мм).

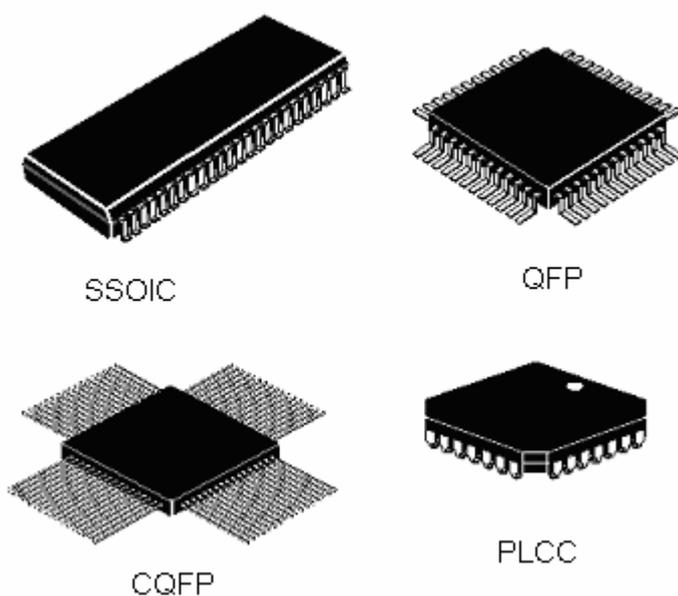


Рис. 5.7. Некоторые разновидности корпусов ИМ для поверхностного монтажа.

Общемировое потребление микросхем в пластиковых корпусах QFP достигло почти 6 млрд. еще в 1995 г. и с тех пор ежегодно возрастает примерно на 25 %.

Наиболее важным вопросом при производстве корпусов QFP является ограничение периметра корпуса. При разработке корпусов для больших ИМ возникает противоречие: либо изготавливать корпус большего размера, что приводит к увеличению длины электрических соединений, снижению частотных характеристик и увеличению массогабаритных показателей всей сборки, либо уменьшать шаг выводов, что приводит к большим проблемам для технологов.

Для QFP процесс нанесения припойных паст методами трафаретной печати на контактные площадки ПП остается самым критическим процессом, вызывающим снижение коэффициентов воспроизводимости сборочной системы. Это приводит к усложнению относительно простых автоматических станков для трафаретной печати, поскольку в таких автоматах не обойтись без автоматического оптического контроля количества и качества нанесения припойной пасты.

Особое внимание для этих корпусов уделяется аккуратному обращению с компонентом при формовке его выводов, тестировании и транс-

портировке на сборочное производство: для шагов выводов 0,635 мм и менее толщина выводов очень небольшая и они легко деформируются, приводя к появлению дефектов типа непропайки при сборке.

2.2) TAB (Tape Automated Bonding, или TCP – Tape Carrier Package) – в технологии TAB кремниевые кристаллы крепятся к полимерной ленте, на которую нанесены металлические пленочные проводники, формирующие внутренние соединения выводов кристалла. Присоединение выводов чипа к сборке следующего уровня (печатной плате либо иной подложке) достигается при помощи внешних выводов полимерной ленты. Для соединения внешних выводов компонента TAB с подложкой обычно используются методы контактной пайки, пайки горячим газом или лазерной микросварки. Сборка очень компактна, высота ее не превышает 0,75 мм. 320-выводной корпус с шагом выводов 0,25 мм весит не более 0,5 г и имеет габариты 24x24 мм. Для сравнения: 296-выводной пластиковый QFP корпус весит 9,45 г.

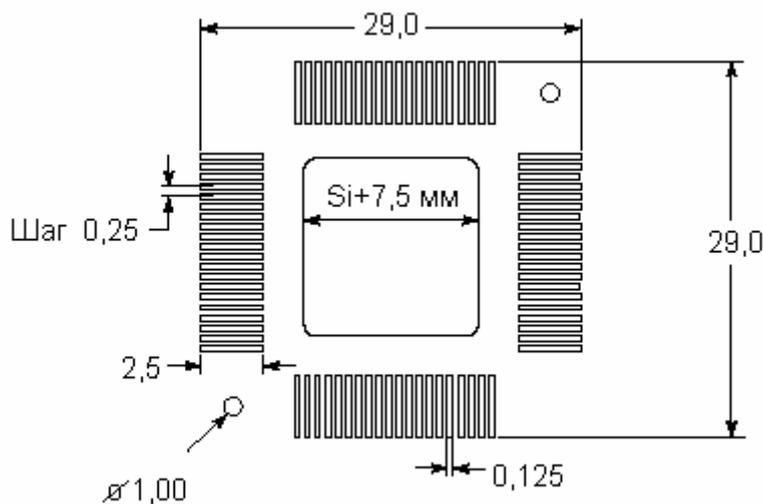


Рис. 5.8. Габаритные размеры посадочного места на ПП для установки корпуса TAB на 80 выводов. Размеры в мм.

Полностью технология TAB освоена только весьма ограниченным кругом ведущих технологических фирм мира.

Самым широким применением технологии TAB в США в настоящий момент является процессор Pentium для портативных персональных компьютеров (ноутбуков). Примером TAB сборки являются различного рода жидкокристаллические индикаторы или дисплеи на стекле. Скорее всего, в будущем технология TAB будет вытеснена из микропроцессорной индустрии такими компонентами, как BGA (Ball Grid Array) или флип-чип (flip chip).

Третий тип корпусов – LCCC (безвыводные керамические или пластиковые кристаллоносители, рис.5.9).

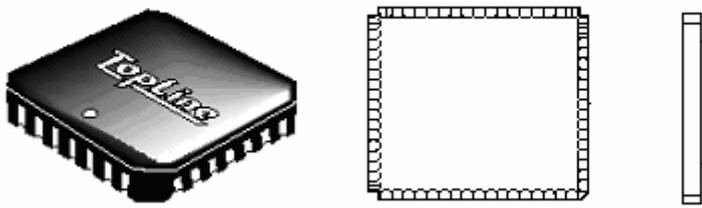


Рис. 5.9. Корпус ИМ типа LCCC.

Выполняется корпус из пластика или керамики. Количество выводов – от 5 до 84. Шаг выводов от 1,27 мм до 0,5 мм. Отсутствие выводов позволяет увеличить плотность компоновки узла по сравнению с корпусами, имеющими выводы (DIP, QFP, SO). Несколько более затруднен контроль паяных соединений этого корпуса с контактными площадками ПП, поскольку часть паяного соединения находится под корпусом микросхемы. Кроме того, для корпусов больших размеров актуальными становятся дефекты паяных соединений, вызванные усталостным разрушением металла припоя из-за термоциклирования в процессе эксплуатации изделия.

Четвертый тип корпусов для ИМ – компоненты BGA (Ball Grid Array – шариковые выводы с матричным расположением). К ним относится также технология CSP (Chip-Scale Packages), флип-чип (flip chip). Отличительной чертой этой категории корпусов является наличие контактов на нижней плоскости корпуса в виде шариковых выводов, расположенных в общем случае в виде прямоугольной матрицы (рис. 5.10).

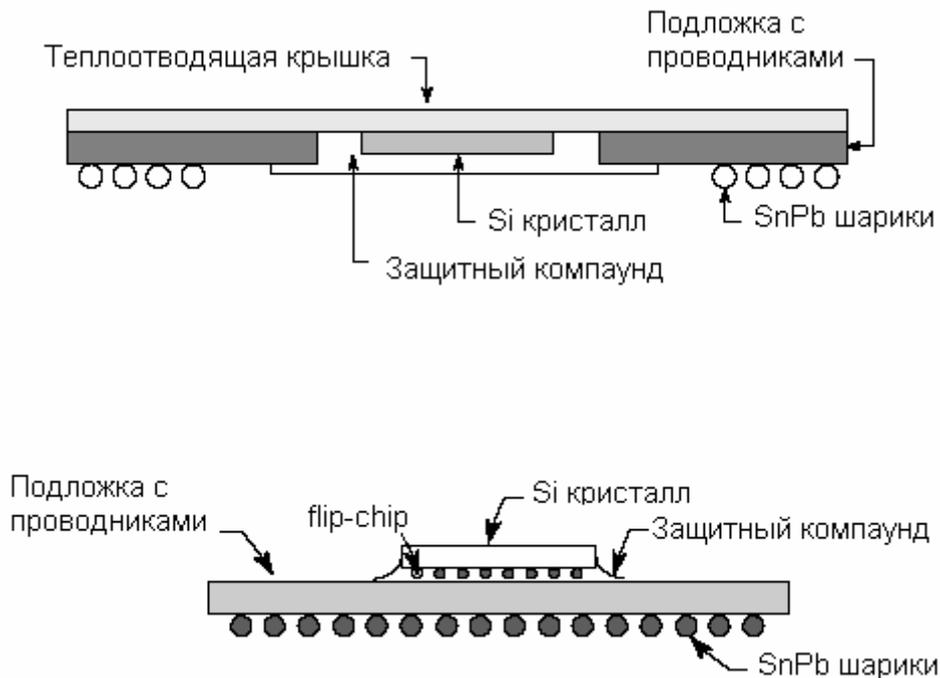


Рис. 5.10. Некоторые варианты корпусов ИМ типа BGA.

Такая конструкция корпуса позволила несколько увеличить шаг выводов, и для большинства корпусов он составляет 1,0 или 1,27 мм, что

несколько упрощает разводку проводников на ПП. Количество выводов корпуса имеет широкий диапазон: от 36 до 2401, при этом габариты от 7x7 до 50x50 мм. Высота такого корпуса не превышает 3,5 мм. Кроме того, шариковые выводы на основе *SnPb* сплава дали удивительное послабление технологам при выполнении операций установки корпуса на плату: неточность попадания выводов на контактную площадку ПП может составлять до 50%! Все дело в том, что при оплавлении припойной пасты на контактных площадках во время пайки за счет сил поверхностного натяжения расплавленного припоя происходит самоцентрирование корпуса микросхемы и неточность практически устраняется.

Преимущества корпусов типа BGA:

- не требуется формовки выводов;
- уменьшены проблемы копланарности выводов;
- происходит самоцентрирование корпуса при пайке;
- пайка BGA является отработанным и очень устойчивым процессом при наличии технологического оборудования и материалов надлежащего класса;
- меньшие габариты по сравнению с DIP, PGA, QFP, отсюда: меньший вес, меньшая длина электрических соединений, улучшенные частотные характеристики.

Одним из наиболее заметных недостатков корпусов типа BGA является затрудненный визуальный контроль выводов BGA после операции пайки и ремонт узлов. Для контроля соединений BGA в узле используются чаще всего рентгеновское оборудование, но есть и попытки использования оптических установок.

В последние годы вся инфраструктура BGA развивалась стремительно, и сейчас известно много видов этого типоразмера, включая пластиковые, керамические, металлические, стеклокомпозитные, ленточные и другие, а также микро-BGA, более всего напоминающие собой открытые кристаллы.

Вопрос ценовой конкуренции между BGA и другими корпусами ИМ с расположением выводов по периметру корпуса зависит от конкретного применения, однако BGA будет предпочтительнее там, где количество каналов ввода/вывода ИС превышает 256. Использование корпуса BGA при количестве выводов менее чем 256, может быть оправдано только преимуществами в функциональности, размере либо в общей стоимости изделия.

CSP обычно определяется как компонент, размером не более чем на 20 % превышающий размер самого кристалла (рис.5.11). Первоочередными областями применения этих компонентов являются микросхемы памяти (особенно флэш), аналого-цифровые преобразователи, процессоры цифровой обработки сигнала, а также микросхемы специального применения (ASIC) и микропроцессоры.



Рис. 5.11. Структура корпуса ИМ типа CSP.

Технология флип-чип представляет собой *Si*-кристалл, непосредственно устанавливаемый на коммутационную подложку узла (например, ПП) лицевой стороной вниз, на которой выполнены внешние контакты в виде припойных шариков из более тугоплавкого сплава, чем *SnPb*. Из-за того, что выводы формируются на кремниевом кристалле микросхемы, шаг выводов является очень малым и составляет 0,152 мм, что приводит к усложнению ПП. Назовем преимущества такой технологии:

- экономия места на ПП;
- малые габариты и вес узла с такими компонентами;
- снижение стоимости материалов (у кристалла нет корпуса);
- сокращение длины электрических межсоединений, что обеспечивает лучшие электрические параметры;
- меньшее количество соединений, что сокращает количество потенциальных точек отказа и обеспечивает более эффективный отвод тепла.

Эта технология весьма популярна в последние годы, она обозначает передовые тенденции технологии монтажа на поверхность, но имеет и свои недостатки:

- дороговизна технологии формирования шариковых выводов у кристалла;
- чрезвычайно плотная разводка платы под посадочное место для флип-чипа, что приводит к повышению расходов на изготовление платы;
- большой объем работы технологов по оптимальному выбору флюющих веществ и адгезивов в зависимости от вида флип-чипа, подложки и процесса;
- трудности контроля качества в технологии флип-чипов, а также ремонта плат с их применением.

Инфраструктура поддержки технологии флип-чип для электронной индустрии до сих пор развита не столь сильно, как для других стандартных технологий. 60 % всего мирового потребления флип-чипов приходится на микросхемы с низким числом каналов ввода/вывода, используемых в производстве электронных часов и автомобильной электроники.

Ожидается рост использования флип-чипов в портативных средствах связи, что, вероятно, будет актуально и для электроники России в ближайшие несколько лет, а также в изделиях компьютерной техники высокой степени сложности.

5.3. НЕСТАНДАРТНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

Автоматизация сборки на платы нестандартных компонентов весьма дорога из-за их малого количества на плате и большого разнообразия типов конструкций (см., например, рис. 5.12).

Однако последние годы автоматизация процессов, связанных с нестандартными компонентами, развивается весьма активно, что приносит производителям электронных модулей существенные преимущества. Быстро развивается инфраструктура поддержки данного направления технологии. Разрабатываются новые типы корпусов, близкие по формам к стандартным, которые способны выдерживать высокие температуры при пайке оплавлением припойных паст.

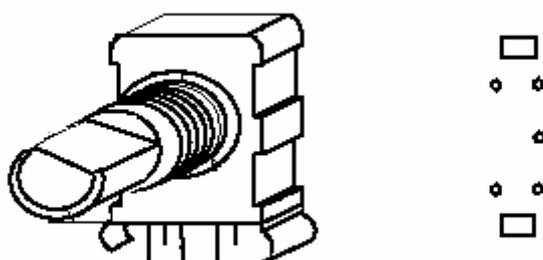


Рис. 5.12. Пример энкодера – нестандартного компонента и посадочного места на плате для него (Энкодер – устройство для распознавания параметров вращения вала).

Выделяются три ключевые области электронной индустрии, для которых условия рынка и преимущества, предлагаемые автоматизацией технологии нестандартных компонентов, стали эффективными:

1. Индустрия производства персональных компьютеров и периферийных устройств, например, принтеров, модемов и сетевых адаптеров.

2. Индустрия производства средств связи, например, электронных модулей для автоматических телефонных станций различных уровней, а также изделий, которые составляют всю инфраструктуру сотовой связи (базовые станции).

3. Индустрия производства автомобильной электроники, например бортовых компьютеров и сенсорных устройств.

Основные причины, заставляющие производителей рассматривать и внедрять автоматизацию нестандартных компонентов, следующие:

- желание избавиться от пайки волной припоя;
- высокие качество и скорость автоматических сборочных комплексов;
- возрастающее количество нестандартных компонентов в соответствующей технологической упаковке, которые способны выдерживать высокие температуры печей оплавления припойных паст;
- снижение стоимости процессов и материалов, связанных с конструкциями корпусов компонентов для автоматической сборки;
- создание нового поколения многофункциональных автоматических сборочных линий, способных решать задачи по автоматизации технологии сборки нестандартных компонентов.

В последнее время электронная промышленность мира быстро движется к установлению единых стандартов сборочно-монтажных технологий при использовании нестандартных компонентов.

5.4. ВЫВОДНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

Сборочно-монтажные технологические процессы с применением традиционных выводных компонентов (рис. 5.13) стояли у истоков автоматизации индустрии сборки узлов РЭА. В свою очередь, зарождение технологии монтажа на поверхность и ее бурный рост в 80-е годы, который продолжился и в 90-е годы, породили у многих мнение о том, что обычные выводные компоненты доживают свой век, и эта технология уйдет в историю в скором будущем.

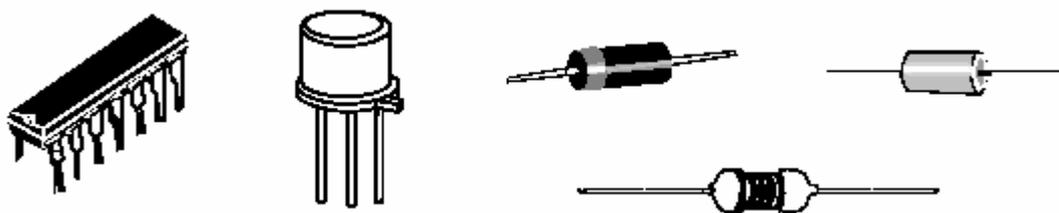


Рис. 5.13. Выводные компоненты.

Однако во второй половине 90-х годов стало ясно, что технология сборки выводных компонентов выжила перед лицом монтажа на поверхность, показав себя достаточно конкурентоспособной по ряду важнейших факторов.

Инфраструктура технологии монтажа в отверстия гораздо проще и потому эффективнее, чем технологии монтажа на поверхность. Это приводит к тому, что, например, в развивающихся странах сборочные процессы всегда начинают с технологии выводных компонентов, что выгодно и по экономическим причинам, поскольку электронными изделиями первой необходимости в таких странах являются, например, стационарные телефоны, телевизоры или холодильники, производимые, как правило, с подавляющим применением выводных компонентов. По мере того как идет экономическое развитие страны, возникает необходимость в наращивании производственной базы потребительской электроники, что также развивает технологию выводных компонентов.

В современной технологии сборки выводных компонентов можно отметить следующие тенденции:

- она развивается в тех странах, где ощущается недостаток инвестиций, где низка стоимость рабочей силы и где квалификация операторов, обслуживающего персонала и технологов находится в состоянии развития;

- в этих странах низкая стоимость сборки и низкая стоимость плат приводят к широкому использованию выводных компонентов в простых электронных модулях;

- в ряде случаев полностью отсутствуют компоненты в поверхностно-монтажном виде либо они слишком дороги. Это силовые устройства (регуляторы напряжения, транзисторы, диоды, резисторы), а также ряд электролитических конденсаторов, потенциометров, индуктивностей, реле и оптоэлектронных устройств.

Ведущие производители оборудования для сборочно-монтажных процессов в технологии выводных компонентов видят своей главной задачей в ближайшем будущем значительное улучшение технологии сборки и разработки машин и систем нового поколения. Поддержка и инвестиции этого направления гарантированы, поскольку даже сейчас технология монтажа в отверстия обеспечивает наиболее низкую стоимость и наиболее высокую производительность (в пересчете на 1 м² занимаемой площади), а потому имеет весьма прочные позиции в значительном количестве сборочных производств с большой программой выпуска.

6. ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

Основу модуля первого уровня составляет оригинальная деталь – коммутационная подложка, на которой устанавливаются компоненты и которая обеспечивает электрическое соединение между компонентами в соответствии с ЭЗ (см. п. 2.2). В общем случае подложка представляет собой диэлектрическое основание и рисунок в виде металлических пленочных проводников, называемых печатными проводниками. Отсюда самое распространенное название таких плат – печатные платы (ПП). В соответствии с ГОСТом различают следующие типы ПП: односторонние, двусторонние, многослойные и гибкие ПП.

К материалу диэлектрика ПП предъявляются различные требования: поверхностное и объемное сопротивление должно быть не менее 10^9 Ом·см, относительная диэлектрическая проницаемость – $4 \div 5$. Уменьшение ε необходимо для уменьшения паразитных емкостных связей на плате, поскольку между проводниками иногда имеются очень небольшие зазоры.

В производстве ПП используются основания из композиционных материалов, состоящих из армирующих компонентов и связующего материала. Армирующие компоненты применяются для того, чтобы:

- придать основаниям жесткость и прочность;
- увеличить нагревостойкость и прочность при воздействии температуры пайки;
- выровнять температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) металлов и материала ПП.

При изготовлении листовых композиционных материалов армирующие ткани пропитываются смолой и полимеризуются в прессах. При отверждении композита полимеры (связующий материал) усаживаются (до 20%). Например, усадка полимеров на основе полиимида составляет 17%. Усадки создают большие механические напряжения в композитах, которые приводят к сильному короблению оснований, отслоению смолы

от армирующих компонентов, отрыву фольги и металлизации от диэлектрического основания. Только эпоксидная смола обладает уникально низкой усадкой (до 3%) и отличной склеивающей способностью. Этим обусловлено применение стеклоэпоксидных композиций в изделиях ответственного назначения.

Эпоксидные смолы, как и другие полимеры, при нагреве расширяются. Особенно интенсивно расширение происходит после перехода температуры стеклования T_c . Отечественные стеклопластики и большая часть импортных имеют $T_c = 100 \div 110^\circ\text{C}$. При пайке они до такой степени расширяются, что могут ослабить металлизацию сквозных отверстий. Специальные сорта импортных материалов, в частности, группы FR-4, начинают интенсивное расширение только после 180°C . Это соответствует температуре пайки. Именно по этой причине для ПП повышенной надежности применяют материалы с повышенной температурой перехода. Из таких материалов - полиимид, имеющий высокую температуру стеклования (до 200°C). Он особенно перспективен для плат высокой плотности монтажа с диаметром отверстий порядка 0,1 мм. Композиция полиимида с кварцевой тканью имеет низкую диэлектрическую проницаемость ($\epsilon = 2,3$), что позволяет использовать ее в изделиях сверхвысокочастотного диапазона.

Кроме электрических характеристик, платы должны отвечать достаточно широкому набору конструктивно-технологических характеристик: обеспечивать достаточную прочность и жесткость сборочному узлу на их основе, не подвергаться расслоению и короблению во время технологической обработки и эксплуатации, обеспечивая в то же время легкость при механической обработке во время изготовления платы.

Поскольку на плате жестко (при помощи пайки или других способов сборки) крепятся компоненты из разнородных материалов, большую проблему представляет согласование температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) материала платы (диэлектрика) и компонентов. Чаще всего эта задача является неразрешимой (см. табл. 6.1).

Таблица 6.1

ТКЛР материалов, применяемых в РЭА

Материал	ТКЛР, 10^{-6} град $^{-1}$
FR-4	14÷18
Полиимид	45
Полиимидное стекловолокно	16
Керамика	6

Параметры технологических процессов сборки узлов должны учитывать эту проблему, чтобы максимально уменьшить количество дефектов после различных операций.

6.1. КОНСТРУИРОВАНИЕ ПП

Традиционно сложившаяся практика разделения труда при организации разработки и производства функциональных узлов РЭА предполагает участие в этом процессе специалистов разного профиля, работаю-

щих в нескольких производственных подразделениях предприятия:
радиоинженера-разработчика электронной схемы;
конструктора печатных плат, занимающегося, в том числе, трассировкой печатного монтажа;
конструктора модулей-субблоков, объединяющего модуль нулевого уровня (ПП как деталь) с базовой несущей конструкцией (БНК), в результате чего получается конструкция модуля 1-го уровня;
работников технологической службы, разрабатывающих ТП производства ПП и остальных составных частей модулей РЭА;
службы нормоконтроля, следящей за соблюдением всеми участниками производственного процесса норм проектирования, установленных действующими стандартами ЕСКД, ЕСТД и др.

При этом необходимо тесное взаимодействие всех участников процесса, понимание ими ограничений, которые налагают на полет их инженерной мысли условия и технический уровень производства, которому предстоит выполнять их проект. Среди этих ограничений, как правило, присутствуют требования унификации конструкций, предписывающие непременно уложить разрабатываемые модули в принятую на предприятии или в отрасли структуру БНК. Важными факторами являются также точность и степень износа производственного оборудования, стабильность технологических процессов.

С приходом на рабочее место инженера-разработчика и конструктора персональных ЭВМ, оснащенных мощным программным обеспечением САПР (системы автоматического проектирования) произошел настоящий качественный скачок в производительности труда при разработке и изготовлении такой массовой продукции как модули РЭА на ПП.

При этом оказывается возможным сосредоточить весь процесс проектирования на одном рабочем месте, т.е. отойти от традиционного распределения ролей между участниками проектирования схемы, конструкции и технологии. Это особенно актуально для фирм с малочисленным персоналом, где по экономическим соображениям невыгодно содержать отдельные конструкторские и технологические службы. В таких условиях специалист, берущийся за разработку модулей РЭА от идеи (электрической схемы) до ее конструктивного воплощения, должен обладать знаниями из смежных областей, в частности, знать технологию ПП, без чего невозможно рассчитывать на достижение высоких технических показателей устройств.

Применение компьютера, конечно, не исключает и традиционного разделения труда между участниками производственного процесса. Навстречу этому пошли и разработчики программного обеспечения САПР. Так, например, в состав САПР ACCEL P-CAD 2000/2001 входит программа RELAY (эстафета), обеспечивающая возможность обмена данными между разработчиком схемы и конструктором ПП по внутрикорпоративной компьютерной сети, в результате чего каждый из них занимается выполнением своих профессиональных обязанностей, но имеет возможность контролировать прохождение проекта и оперативно вносить в раз-

работку необходимые поправки.

Существует несколько конструктивных разновидностей ПП.

Односторонние ПП обладают невысокой надежностью и механической прочностью крепления навесных компонентов, которые практически висят на пайках. В местах присоединения компонентов велика возможность отслоения проводников при перепайках или при механическом воздействии на их выводы. При невозможности стопроцентной разводки печатных проводников применяются навесные переключки. Платы этой разновидности применяются почти исключительно в бытовой РЭА.

Двухсторонние ПП обеспечивают высокую плотность установки компонентов и трассировки. Переходы проводников из слоя в слой осуществляются через металлизированные переходные отверстия. Эти платы допускают как монтаж компонентов на поверхности, в том числе и с двух сторон, так и монтаж компонентов с осевыми и штыревыми выводами в металлизированные монтажные отверстия. Двухсторонние ПП являются самой распространенной разновидностью ПП в производстве модулей РЭА.

Многослойные ПП (МПП) обеспечивают очень высокую плотность монтажа компонентов и прокладки трасс печатного монтажа. Они допускают монтаж всех видов компонентов.

Из множества предложенных в свое время вариантов конструкций в настоящее время практически используются два:

четырёхслойные платы попарного прессования;

МПП с металлизацией сквозных монтажных и переходных отверстий.

Первая разновидность изготавливается по технологии двухсторонних ПП с металлизацией отверстий. Две двухсторонние платы точно совмещаются и склеиваются под прессом через изоляционную прокладку. После этого в получившемся пакете сверлятся и металлизуются отверстия для перехода сигнальных цепей с платы на плату и монтажа компонентов со штыревыми выводами.

Вторая разновидность выполняется путем последовательного наращивания слоя на слой, с точным совмещением и склеиванием, после чего сверлятся и металлизуются сквозные отверстия для перехода сигнальных цепей со слоя на слой и монтажа штыревых выводов компонентов. Металлизация сквозных отверстий – очень ответственная операция: нужно обеспечить надежный контакт металла, наносимого на стенки отверстия, со слоями фольги толщиной порядка 35 мкм, выходящими заподлицо с поверхностью отверстия.

Еще более трудоемка технология изготовления МПП со скрытыми межслойными переходами во внутренних слоях: приходится выполнять операции металлизации отверстий по ходу наращивания слоев МПП.

Тем не менее, к настоящему времени технология МПП в достаточной степени освоена во всем мире. Можно встретить узлы РЭА массовых классов с 6-12-слойными МПП. Известны опытные образцы, содержащие до 100 слоев. Широко используемые САПР P-CAD допускают автоматическую трассировку до 32-х слоев печатного монтажа, хотя, как следует

из проведенного обсуждения, трудность изготовления МПП определяется возможностями технологии, а не производительностью САПР.

Приступая к конструированию, следует ознакомиться с требованиями к ряду параметров ПП, регламентированных стандартами.

6.2. КЛАССЫ ТОЧНОСТИ ПП

Отечественным стандартом ГОСТ 23751-86 предусматривается пять классов точности (плотности рисунка) ПП (см. табл. 6.2). Выбор класса точности определяется достигнутым на производстве уровнем технологического оснащения. В КД должно содержаться указание на необходимый класс точности ПП.

Таблица 6.2

Наименование параметра	Условное обозн.	Размеры элементов проводящего рисунка для классов, мм				
		1	2	3	4	5
Расстояние между проводниками, контактными площадками, металлизированными отверстиями	t	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
Расстояние от края просверленного отверстия до края контактной площадки данного отверстия	S	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
Отношение минимального диаметра металлизированного отверстия к толщине платы	f	0,4	0,4	0,33	0,25	0,2

Платы первого и второго классов точности не требуют для своего изготовления оборудования с высокими техническими показателями. Такое оборудование обычно имеется на рядовом радиозаводе с тех времен, когда только внедрялась технология печатного монтажа. Платы этих классов просты в изготовлении, дешевы, но не отличаются высокими показателями плотности компоновки и трассировки.

Для изготовления плат высшего, пятого класса требуется специализированное высокоточное оборудование, специальные, как правило, дорогие материалы, безупрочная пленка для изготовления фотошаблонов, идеальная чистота в производственных помещениях, вплоть до создания "чистых" участков (гермозон) с кондиционированием воздуха и поддержанием стабильного температурно-влажностного режима. Технологические режимы фотохимических и гальвано-химических процессов также должны поддерживаться с высокой точностью. Большинство отечественных предприятий не располагает такими условиями производства. Так что будем считать пятый класс практически недостижимым в условиях отечественного производства, по крайней мере, массового.

Для изготовления плат четвертого класса точности также требуется высокая культура производства и высокоточное оборудование, но требования к его характеристикам ниже, чем для плат пятого класса, поэтому

целому ряду производителей удается массовый выпуск плат этого класса.

Массовый выпуск плат третьего класса надежно освоен основной массой отечественных предприятий, поскольку для их изготовления требуется рядовое, хотя и специализированное оборудование, требования к материалам и технологии не слишком высоки.

Зарубежными стандартами установлена другая классификация точности ПП. Эта классификация (см. табл. 6.3) увязана с шагом проектирования и шагом расположения контактов компонентов.

Таблица 6.3.

Класс	Ширина проводника и зазоры	Шаг проектирования		Шаг выводов ЭРЭ	
		наружные слои	внутренние слои	планарные	матричные
0	0,2	1,25	0,625	0,625	2,5
1	0,15	0,625	0,625	0,5	1,25
2	0,1	0,625	1	0,5	1
3	0,075	0,5	1	0,5	1
4	0,05	0,5	0,5	0,25	0,5
5	0,05	0,25	0,25	0,25	0,5

Видим, что из элементов печатного рисунка нормированы только ширина проводника и зазоры. Что касается самой точности, то оказывается, что платы самого грубого нулевого класса по точности превосходят платы массового отечественного третьего класса. Данные по шагам проектирования и шагу выводов связывают точность плат с применяемой компонентной базой, в частности, с типами корпусов ИМ.

6.3. РАЗМЕРЫ ПП

Требования к размерам ПП регламентированы отечественными и зарубежными стандартами, наиболее распространенные из которых фактически стали международными.

Отечественный стандарт ГОСТ 10317-79 устанавливает следующие требования к размерам ПП:

1) предельный размер стороны не более 470 мм (ограничивается размерами гальванических ванн, листа фотопленки и аппаратуры для экспонирования фоторезиста);

2) размеры сторон должны быть кратны:

- 2,5 мм при длине стороны не более 100 мм;
- 5,0 мм при длине стороны не более 350 мм;
- 10,0 мм при длине стороны более 350мм;

3) соотношение сторон не более 3:1;

4) шаг координатной сетки должен составлять 0,5 мм, 1,25 или 2,5 мм.

Последнее требование уже устарело, поскольку появились компоненты с шагом, меньшим 0,5 мм. Кроме того, применяются зарубежные компоненты с шагом в долях дюйма. Более того, отметим, что получающая все более широкое распространение в отечественной практике

САПР ACCEL P-CAD 2000/2001 даже при настройке на метрическую систему единиц использует внутреннее дюймовое представление всех размеров, конвертируя миллиметры в дюймы при вводе данных и округляя при выводе данных до необходимого миллиметрового размера с точностью в 0,001 мм. Точность позиционирования рабочих органов современных станков ЧПУ не препятствует использованию такой процедуры в САПР.

Габаритные, установочные и присоединительные размеры ПП обычно координируются с той или иной системой БНК.

Известно множество систем БНК, и все они предполагают прямоугольную форму плат всех типов и размеров. Лишь в исключительных, технически обоснованных случаях допускается отступать от прямоугольной формы, применяясь к конкретным условиям установки и эксплуатации функционального узла.

Начнем с "европейских" стандартов, нашедших также широкое применение в отечественной практике. Это два стандарта Международной электротехнической комиссии: стандарт МЭК 297 (ТЕС 297-3), совпадающий с немецким стандартом DIN 41494, и так называемый метрический стандарт МЭК 917 (IEC 917-2-2), который, по мысли его авторов, должен заменить стандарт МЭК 297.

Стандарт МЭК 297 носит название 19-дюймового, по размеру ширины передней панели базового модуля 2-го уровня. Несмотря на "дюймовое" название, геометрические размеры печатных плат в этом стандарте представляют гибрид метрических и дюймовых размеров. Это объясняется, по-видимому, англо-германскими корнями стандарта.

Базовый размер печатной платы составляет 100x100 мм.

Единица приращения размера по высоте, обозначаемая как 1U равна $1,75''=44,45$ мм. Этой величине кратна высота передних панелей блоков. Значение этой кратности входит в обозначение ПП, хотя самого этого размера на плате нет.

Единица приращения размера в длину (глубину) составляет 60 мм.

Единица кратности по ширине передней панели составляет $0,2''=5,08$ мм.

Существует отечественный стандарт ГОСТ 28601.3-90, в котором ряд типоразмеров для плат и других элементов конструкции модулей РЭА полностью соответствует стандарту МЭК 297. Четыре типоразмера плат из этого ряда образуют ряд унифицированных типовых конструкций УТК-2 и получили в отечественной практике название "Европлата". Под эти платы поставляются также все остальные конструктивные элементы БНК.

6.4. МАРКИРОВКА НА ПП

Маркировка ПП подразделяется на обязательную и дополнительную. К обязательной маркировке относится обозначение ПП по ГОСТ 2.201-80 ("децимальный номер") или какой-либо условный шифр, даты изготовле-

ния и номера версии фотошаблона, а также технологические маркеры, не обозначаемые на чертеже ПП, но вводимые в фотошаблон изготовителем платы.

Дополнительная маркировка содержит обозначение заводского номера платы или партии плат, обозначение контуров мест установки и позиционные обозначения компонентов и другую информацию, служащую для удобства монтажа, регулировки и эксплуатации модуля.

Часть маркировки может быть выполнена травлением, одновременно с проводниками, но для этого на плате должно быть свободное место. Далеко не всегда такое место есть. Кроме того, при выполнении проекта средствами САПР маркировочные знаки, выполняемые травлением в слоях проводников, получают статус цепей, не имеющих подключенных компонентов. К таким цепям САПР относится с большим подозрением и выдает при электрическом контроле или при сверке списков цепей схемы и платы сообщения об ошибках, нервирующие разработчика. Тем не менее, такая маркировка применяется для обозначения номера чертежа ПП или ее шифра, с тем, чтобы в массовом производстве можно было идентифицировать платы, поступающие с операций химической обработки, когда на них еще нет другой маркировки. Высота символов такой маркировки должна быть не менее 2,5 мм, иначе их невозможно будет читать. Шрифт для маркировки должен быть близок по начертанию к стандартным шрифтам по ГОСТ 26.020-80.

Дефицит свободного места на ПП не мешает выполнять маркировку способами офсетной печати (сеткографии, шелкографии и т.п.). Маркировка лишь не должна попадать на места пайки.

6.5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ РИСУНКА ПРОВОДНИКОВ ПП И ПАЯЕМОСТЬ

Искусство проектирования топологии контактных площадок компонента на ПП (знакоместа) связано с необходимостью обеспечения максимальной плотности узла, что предполагает минимизацию топологии знакоместа. В то же время проектирование должно допускать оптимизацию рисунка коммутации и тем самым упрощать проектирование устройств путем, например, уменьшения количества слоев ПП и числа используемых межслойных переходов, а также повышать выход годных изделий в процессе изготовления (обе эти задачи диктуют необходимость оптимизации топологических параметров знакомест). Следовательно, в процессе проектирования знакомест необходимы компромиссы.

Проектирование топологии знакомест обычно состоит из трех отдельных этапов: разработки рисунка контактных площадок, разработки рисунка для маскирующего покрытия и рисунка трафарета для нанесения припойной пасты. Для повышения выхода годных в процессе производства расчеты на этих этапах должны быть точными и, кроме того, позиционно скоррелированными друг с другом.

Основное ограничение, налагаемое на ПП при поверхностном мон-

таже компонентов, связано с достижимым уровнем разрешения главных размеров, например шага контактных площадок, шага «контактная площадка - коммутирующая дорожка» и шага коммутирующих дорожек. При малом шаге припойные площадки могут соединяться между собой перемычками припоя. С целью минимизации перемычек размер самих контактных площадок можно уменьшить, но для формирования надежного соединения необходимо, чтобы контактная площадка выступала из-под корпуса компонента на некоторое минимальное расстояние. В этом случае смачиваемые припоем поверхности будут иметь достаточную площадь для образования мениска (или галтели) припоя, по виду которого производится оптический контроль качества пайки.

Следует избегать попадания адгезива, используемого для фиксации компонентов при сборке, на контактные площадки знакомест компонентов, например чип-резисторов и чип-конденсаторов.

Паяемость является ключевым аспектом проектирования для обеспечения воспроизводимости технологического процесса. Наибольшее влияние на выход годных плат во время первичных отбраковочных испытаний оказывает частота появления дефектов в процессе пайки и очистки. Сам по себе процесс пайки оплавлением дозированного припоя не порождает дефектов, они могут возникнуть, например, вследствие неоптимального проектирования топологии платы и в процессе нанесения припойной пасты через трафарет.

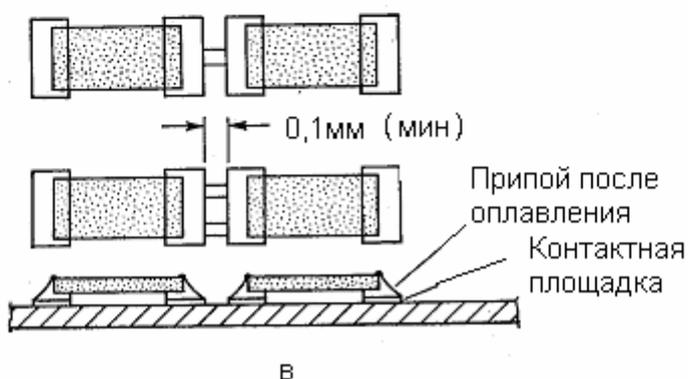
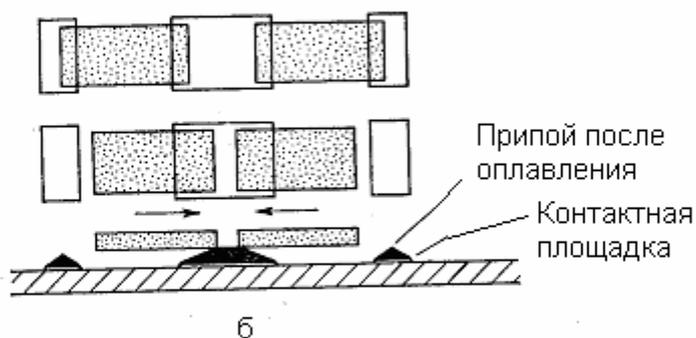
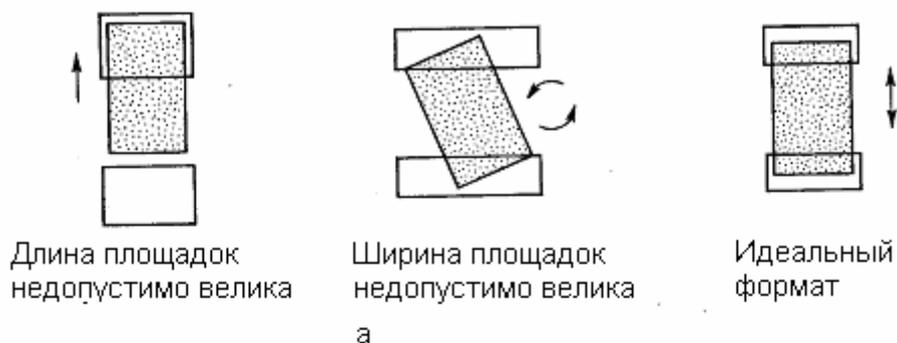
Проектирование контактных площадок для компонентов на ПП зависит от технологии пайки узла. В этом отношении пайка волной припоя и пайка расплавлением дозированного припоя существенно отличаются друг от друга.

Пайка волной припоя применима только к компонентам, монтируемым на поверхность и устанавливаемым с нижней стороны платы, которые могут выдержать погружение в ванну с припоем. Применение пайки волной припоя для поверхностных компонентов ограничивается из-за эффекта затенения корпусами компонентов контактных площадок, подвергаемых пайке. Для устранения эффекта затенения требуется увеличение топологических размеров знакомест компонентов, например в направлении движения ПП через ванну с припоем. То есть плотность компоновки платы (узла) зависит от типа применяемого процесса пайки.

Ориентация компонентов не менее важна для эффективной пайки волной припоя некоторых классов приборов. *Лучшие результаты наблюдаются в том случае, когда продольная ось корпуса параллельна направлению движения платы при пайке.* Такая ориентация способствует уменьшению образования перемычек из припоя. Этому также способствует, как показала практика, создание дополнительной, неиспользуемой пары площадок на конце посадочного места корпуса компонента в направлении движения платы. Эти площадки действуют как «ловушки припоя», препятствующие его накоплению на концевых площадках посадочного места компонента. Простые корпуса типа SO или прямоугольные могут быть ориентированы параллельно или перпендикулярно пото-

ку волны, хотя ранее рекомендовалось располагать простые чип-компоненты перпендикулярно волне припоя.

При пайке оплавлением дозированного припоя требуется повышенная точность позиционирования компонентов и нанесения припойной пасты при повышенной плотности монтажа. Надо учитывать эффект скольжения компонента по расплавленному припою. Этот эффект является результатом действия сил поверхностного натяжения жидкого припоя (при оплавлении), которые стремятся затянуть компонент в центр припойной площадки, что обычно приводит к необходимости повышения точности позиционирования компонента (рис. 6.1).



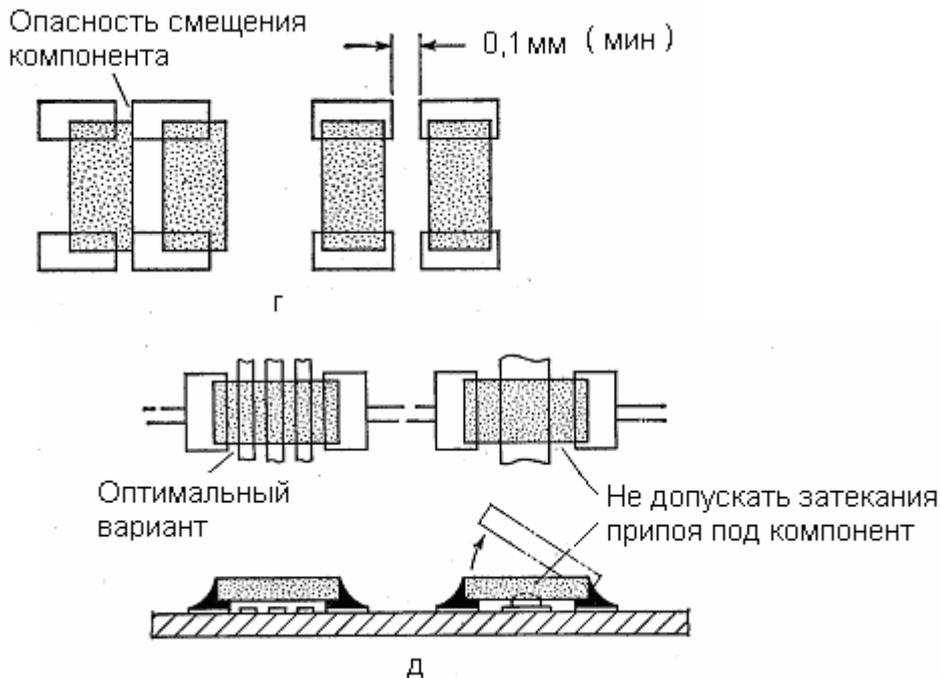


Рис. 6.1. Погрешности форматирования контактных площадок (КП) с учетом пайки оплавлением дозированного припоя: а – конфигурация КП, б – общая КП, в – рекомендованная форма общей КП, г – параллельный монтаж чип-компонентов, д – трассировка под компонентом.

По этой же причине важно, чтобы контактные площадки были одинаковы по форме и размерам, особенно для чип-компонентов. В противном случае неравенство сил поверхностного натяжения на каждой контактной площадке будет способствовать смещению компонента с установленной позиции, что может привести к дефекту типа «надгробный камень». Если длина контактных площадок значительно превышает их ширину, то компонент может сдвинуться и занять только одну из них, что приводит к образованию разомкнутой электрической цепи. В случае, когда площадки слишком широки, компонент может легко потерять требуемую ориентацию. Существуют также специфические проблемы, которые могут возникать, когда контактные площадки под чип-компонент соединяются одна с другой. Если большая контактная площадка спроектирована в виде одного топологического элемента, то во время пайки оплавлением дозированного припоя каждый компонент будет притягиваться к центру этой площадки вследствие большей величины сил поверхностного натяжения припоя. Целесообразнее вместо одной большой площадки проектировать две меньшего размера, соединенных узкой коммутирующей дорожкой; это ограничивает количество аккумулируемого припоя.

При необходимости повышение величины коммутируемых токов рекомендуется увеличивать число дорожек, а не увеличивать ширину одной дорожки, поскольку для широкой коммутирующей дорожки вероятны аккумуляция припоя под компонентом и смещение компонента. Если разводка коммутации под компонентом все же необходима, одну широкую дорожку следует разделять на несколько параллельных меньшей ширины. Нежелательный эффект скольжения может проявиться также

тогда, когда два параллельных чип-компонента расположены очень близко друг к другу. В процессе пайки скользящий компонент может фактически вступить в контакт с припоем под корпусом соседнего компонента. Зазор не менее 0,635 мм, а еще лучше 1,27 мм, уменьшает вероятность этого скольжения.

Хороший практический результат дает соединение между собой зон больших контактных площадок с помощью узких или зауженных коммутирующих дорожек. Это относится к контактным площадкам, соединенным со сквозными межслойными переходами, которые в противном случае могут быть обеднены припоем.

6.6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПП С УЧЕТОМ ТЕСТ-КОНТРОЛЯ

Большинство проблем, связанных с тест-контролем в процессе изготовления изделия и на более поздних стадиях его жизненного цикла, становятся решаемыми, если им уделяется достаточное внимание на этапе проектирования устройств.

Техника поверхностного монтажа требует прецизионных технологических процессов, поскольку ремонт изделий в ТПМК на порядок сложнее и дороже, чем в случае традиционной технологии. Это предполагает высочайшее качество сборки, распознавание видов и причин появления дефектов на различных технологических переходах для оперативного исправления брака. Анализ дефектов обычно включает статистическую обработку результатов контроля параметров качества, выдаваемых функциональными испытательными системами. Даже если выход годных плат по результатам предварительных испытаний составляет 90% и более, все равно необходимо предусмотреть возможность внутрисхемного контроля для обеспечения эксплуатационной надежности этих изделий.

Исходя из экономических соображений, предварительные испытания должны быть функциональными, а последующие, внутрисхемные испытания должны проводиться выборочно и включать анализ дефектов на бракованных платах. Несмотря на то, что внутрисхемный контроль, судя по прогнозам, будет играть второстепенную роль, он все еще продолжает оставаться неотъемлемой частью технологического процесса, поскольку именно такой контроль позволяет осуществлять обратную связь «изделие - технологический процесс».

В сложных системах тестовые (испытательные) площадки, безусловно, снижают плотность монтажа, которая достигается методами ТПМК, а также увеличивают затраты на испытательную оснастку и программное обеспечение процесса контроля. Выбранные тест-площадки должны обеспечивать контроль достаточного набора электрофизических параметров для оценки функциональной способности устройства с применением минимального количества площадок. Удачный выбор тест-площадок, не снижающих плотности монтажа, позволяет уменьшить до 40% затраты на испытания, как следует из сообщений некоторых разработчиков.

Основные рекомендации по проектированию тест-контроля можно представить следующим образом.

Зондовый контакт контрольного (испытательного) приспособления должен осуществляться только с тестовыми площадками либо площадками межслойных переходов, а не с выводами компонентов.

Нельзя осуществлять контроль с двух сторон платы. В случае необходимости вывода испытательной точки на требуемую поверхность платы следует использовать межслойные переходы.

Площадь по периферии платы должна быть свободной. Для надежного прижима испытательной оснастки к плате достаточна свободная полоса шириной не менее 3 мм.

Зондовые измерения не должны сосредотачиваться в одной зоне платы, поскольку плата может деформироваться во время испытаний под действием зондов.

В современной практике минимальным расстоянием между двумя зондами считается размер 1,27 мм, что следует учитывать при проектировании топологии тест-площадок. Можно реализовать и меньшее расстояние, но за счет ощутимых дополнительных затрат на испытательную оснастку.

Высота компонентов, установленных на плате со стороны зондирования (зондовых измерений), не должна превышать 6,35 мм.

Допуски на размещение тест-площадок не должны превышать $\pm 0,05$ мм относительно направляющих технологических отверстий платы. Допуск на диаметр технологического отверстия платы составляет $0 \div 0,0762$ мм.

6.7. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ РИСУНКА ПРОВОДНИКОВ НА ПП

Наиболее общими показателями уровня ПП являются ширина проводников и диаметр межслойных переходов. Тенденция развития ПП характеризуется уменьшением ширины проводников и увеличением количества межслойных переходов за счет уменьшения их размеров.

Для получения проводящего рисунка слоев ПП используются два вида технологии:

- 1) на основе субтрактивных методов,
- 2) на основе аддитивного формирования.

По субтрактивной технологии рисунок проводников получается травлением медной фольги по защитному изображению в фоторезисте или металлорезисте. Рассмотрим три разновидности субтрактивной технологии формирования рисунка.

Первый вариант (рис. 6.2) – негативный процесс с использованием сухого пленочного фоторезиста. Процесс достаточно простой, применяется при изготовлении односторонних и двухсторонних ПП. Металлизация внутренних стенок отверстий не выполняется. Заготовка – фольгированный диэлектрик. Методами фотолитографии с помощью сухого пле-

ночного фоторезиста на поверхности фольги формируется защитная маска, представляющая собой изображение (рисунок) проводников. Затем открытые участки медной фольги подвергаются травлению, после чего удаляется фоторезист, и плата готова.

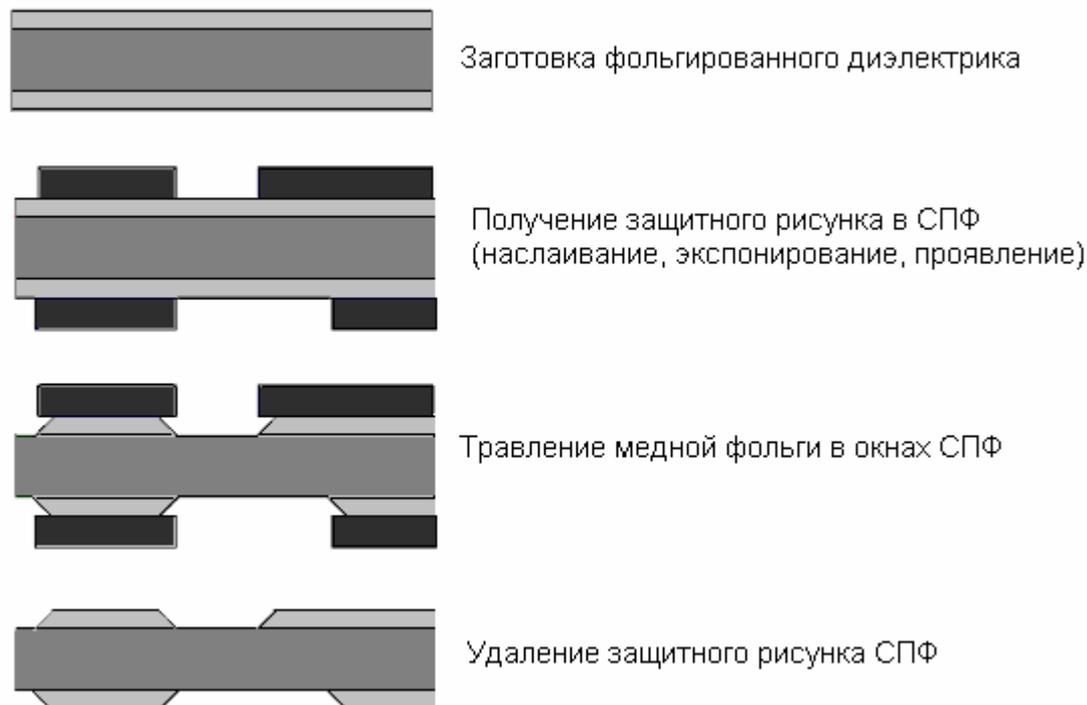


Рис. 6.2. Субтрактивный метод: негативный процесс с использованием сухого пленочного фоторезиста (СПФ).

Второй вариант (рис. 6.3) – позитивный процесс. Создается проводящий рисунок двухсторонних слоев с межслойными металлизированными переходами (отверстиями). Сухой пленочный фоторезист (СПФ) наслаивается на заготовки фольгированного диэлектрика, прошедшие операции сверления отверстий и предварительной (5-7 мкм) металлизации медью стенок отверстий и всей поверхности фольги. В процессе фотолитографии СПФ защитный рельеф получают на местах поверхности металлизированной фольги, подлежащей последующему удалению травлением. На участки, не защищенные СПФ, последовательно осаждаются медь и металлорезист (сплав $SnPb$), в том числе и на поверхность стенок отверстий. После удаления маски СПФ незащищенные (более тонкие) слои меди вытравливаются. Процесс более сложный, однако с его помощью удастся получить металлизированные стенки отверстий.



Рис. 6.3. Субтрактивный метод: позитивный процесс с использованием СПФ и металлорезиста (сплава *SnPb*).

Третий вариант (рис. 6.4) – так называемый тентинг-процесс. Как и в позитивном процессе, берется заготовка в виде фольгированного диэлектрика, формируются отверстия, проводится предварительная металлизация всей платы, включая внутренние стенки отверстий. Затем наносится СФП, который формирует маску во время фотолитографии в виде рисунка печатных проводников и образует завески – тенты над металлизированными отверстиями, защищая их во время последующей операции травления свободных участков медной фольги. В этом процессе используются свойства пленочного фоторезиста наслаиваться на сверленные подложки без попадания в отверстия и образовывать защитные слои над металлизированными отверстиями.

Применение тентинг-метода упрощает технологический процесс изготовления двусторонних ПП с металлизированными отверстиями. Однако необходимо обеспечить гарантированное запечатывание отверстий фоторезистом. Кроме того, качество поверхности металла вокруг отверстий должно быть очень хорошим, без заусениц.

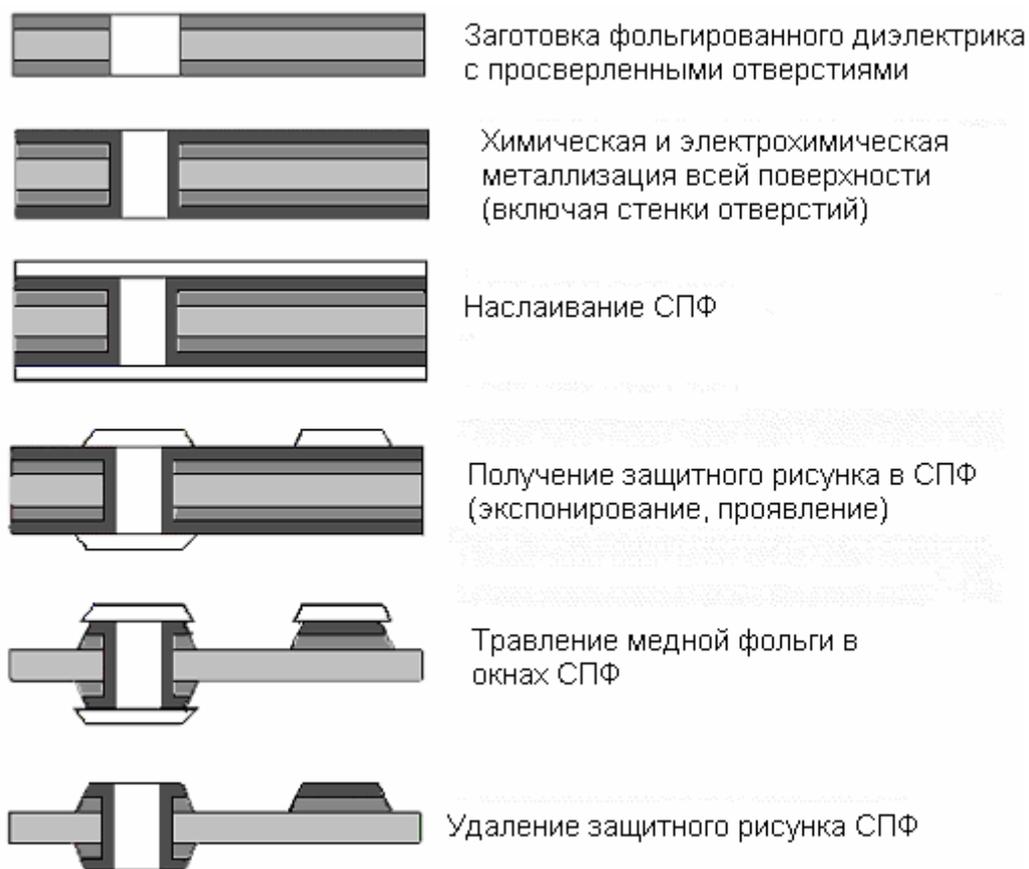


Рис. 6.4. Субтрактивный метод: тентинг-процесс.

Для получения изображений используется пленочный фоторезист толщиной 15-50 мкм. Толщина фоторезиста в случае метода "тентинг" диктуется требованиями целостности защитных завесок над отверстиями на операциях проявления и травления, проводимых разбрызгиванием проявляющих и травящих растворов под давлением 1,6-2 атм и более. Фоторезисты толщиной менее 45-50 мкм на этих операциях над отверстиями разрушаются. Подготовка поверхностей заготовок под наслаивание пленочного фоторезиста с целью удаления заусенцев сверленных отверстий и наростов гальванической меди производится механической зачисткой абразивными кругами с последующей химической обработкой в растворе персульфата аммония или механической зачисткой водной пемзой с последующей химической обработкой в растворе персульфата аммония или механической зачисткой водной пемзой с последующей химической обработкой в растворе персульфата аммония или механической зачисткой водной пемзой с последующей химической обработкой в растворе персульфата аммония. Такие варианты подготовки обеспечивают необходимую адгезию пленочного фоторезиста к медной поверхности подложки и химическую стойкость защитных изображений на операциях проявления и травления. Кроме того, механическая зачистка пемзой дает матовую однородную поверхность с низким отражением света, обеспечивающая более однородное экспонирование фоторезиста.

Фоторезист наслаивается по специально подобранному режиму: при низкой скорости наслаивания 0,5 м/мин, при температуре нагрева валков $115 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, на подогретые до температуры $60 \div 80 \text{ }^\circ\text{C}$ заготовки. При экспонировании изображения используются установки с точечным источником света, обеспечивающим высококоллимированный интенсивный световой поток на рабочую поверхность с автоматическим дозированием и контролем световой энергии.

Субтрактивный метод получения рисунка проводников ПП основан на травлении медной фольги по защитной маске. Из-за процессов бокового подтравливания меди под краями маски поперечное сечение проводников имеет форму трапеции, расположенной большим основанием на поверхности диэлектрика. Величина бокового подтравливания и, соответственно, разброс ширины создаваемых проводящих дорожек зависит от толщины слоя металла: при травлении фольги толщиной 5 мкм интервал разброса ширины проводников порядка 7 мкм, при травлении фольги толщиной 20 мкм разброс составляет 30 мкм, а при травлении фольги толщиной 35 мкм разброс составляет около 50 мкм. Искажения ширины медных проводников по отношению к размерам ширины их изображений в фоторезисте и на фотошаблоне смещаются в сторону заужения. Следовательно, при субтрактивной технологии размеры проводников на фотошаблоне необходимо увеличивать на величину заужения.

Из этого следует, что субтрактивная технология имеет ограничения по разрешению, которые определяются толщиной фольги и процессами травления. Минимально воспроизводимая ширина проводников и зазоров составляет порядка:

- 50 мкм при толщине фольги 5-9 мкм;
- 100 - 125 мкм при толщине проводников 20 - 35 мкм;
- 150 - 200 мкм при толщине проводников 50 мкм.

Для изготовления печатных плат с шириной проводников и зазоров 50 -100 мкм с толщиной проводников 30-50 мкм рекомендуется использовать аддитивный метод формирования рисунка (метод ПАФОС). Это полностью аддитивный электрохимический метод, по которому проводники и изоляция между ними (диэлектрик) формируются селективным гальваническим осаждением проводников и формированием изоляции только в необходимых местах прессованием. Метод ПАФОС, как аддитивный метод, принципиально отличается от субтрактивного тем, что металл проводников наносится, а не вытравливается.

Проводящий рисунок формируется (рис. 6.5) последовательным наращиванием слоев: 1 – получение на временных "носителях" - листах из нержавеющей стали - медной шины толщиной $2 \div 20$ мкм; 2 – формирование рисунка в СПФ; 3 – гальваническое осаждение тонкого слоя никеля ($2 \div 3$ мкм) и меди ($30 \div 50$ мкм) по рисунку освобождений в рельефе пленочного фоторезиста. В защитном рельефе пленочного фоторезиста на верхнюю поверхность сформированных проводников производится также нанесение адгезионных слоев. После этого пленочный фоторезист удаляется, и проводящий рисунок на всю толщину впрессовывается в препрег или другой диэлектрик. Полученный прессованный слой вместе с медной шиной механически отделяется от поверхности носителей.

Если не нужны межслойные переходы, то медная шина стравливается и плата готова.

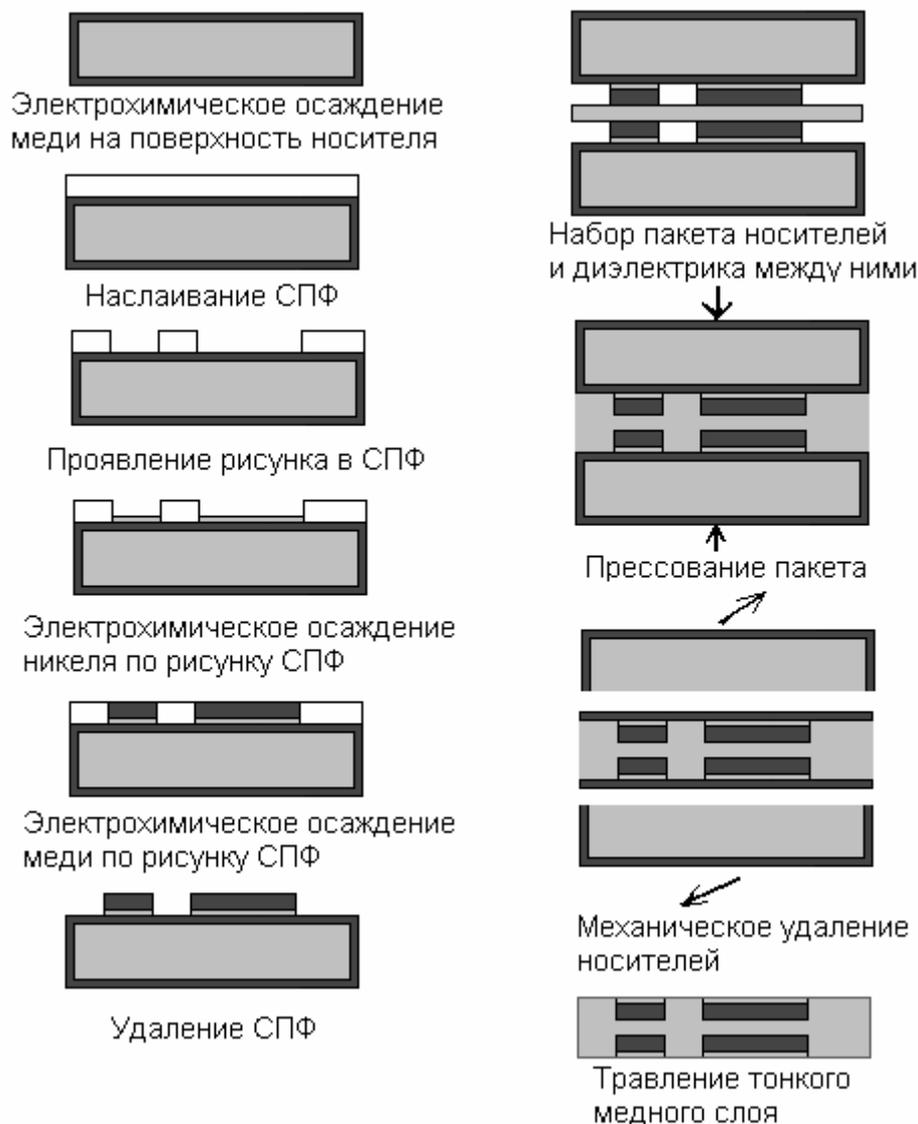


Рис. 6.5. Аддитивный метод (ПАФОС).

При изготовлении двухсторонних слоев с межслойными переходами перед травлением тонкой медной шины сверлятся отверстия и металлизуются, после чего медные шины стравливаются. Проводящий рисунок, утопленный в диэлектрик и сверху защищенный слоем никеля, при травлении медной шины не подвергается воздействию травильного раствора. Поэтому форма, размеры и точность проводящего рисунка определяются формой и размерами освобождений в рельефе пленочного фоторезиста, т.е. процессами фотохимии (фотолитографии). Отсюда к процессам фотолитографии предъявляются более жесткие требования, в частности, оптической плотности белых и черных полей фотошаблонов, резкости края изображения, стабильности температуры и влажности в рабочих помещениях.

Профиль фоторельефа пленочного фоторезиста зависит от применяемой модели светокопировальной установки. При экспонировании на установках с совершенной экспонирующей системой, обеспечивающей высокую коллимацию высокоинтенсивных световых лучей и отсутствие нагрева рабочей копировальной поверхности, фоторельеф имеет ровные

боковые стенки с малым наклоном к поверхности подложки.

При обеспечении требуемых параметров технологического процесса аддитивная технология позволяет получать рисунок проводников на плате с большей точностью и воспроизводимостью:

1) ширина проводников, сформированных в рельефе пленочного фоторезиста, практически по всей высоте проводника равна ширине изображения на фотошаблоне, интервал разброса не превышает 5-10 мкм;

2) искажения ширины проводников на поверхности подложки относительно размеров на фотошаблоне в среднем составляют от 10 мкм до 20 мкм;

3) суммарный интервал разброса ширины проводников по всей высоте фоторельефа не превышает 15-20 мкм.

Таким образом, в отличие от субтрактивной технологии аддитивные процессы принципиально позволяют получать ПП по самым высоким классам точности.

6.8. ПОКРЫТИЯ И МАСКИ ДЛЯ НАРУЖНЫХ СЛОЕВ ПП

Покрытия и маски на ПП выполняются с различными целями. Медные печатные проводники активно окисляются на воздухе, поэтому они должны быть защищены.

Покрытие печатных проводников серебром в настоящее время не применяется. У серебра обнаружено очень неприятное свойство, так называемая миграция: в условиях повышенной влажности под действием электрического поля происходит рост кристаллов-дендритов по поверхности и в глубину изоляционного основания печатной платы. Это приводит к уменьшению электрической прочности изоляции.

Введение в конструкцию ПП паяльной маски является необходимым условием, т.к. обычная стеклоэпоксидная основа печатных плат не обладает достаточной теплостойкостью при температурах пайки (220-240° С), и без паяльной маски за время, необходимое для проведения пайки (0,5-2,5 мин.) может происходить поверхностная деструкция материала диэлектрика. По методу формирования рисунка паяльные маски делятся на два типа:

1) Паяльные маски, рисунок которых формируется методом трафаретной печати. Как правило, это составы на эпоксидной основе, отверждаемые термически или ультрафиолетовым (УФ) излучением. При относительно дешевой основе основным их недостатком является низкая разрешающая способность и необходимость использования сеткографического трафарета.

2) Паяльные маски, рисунок которых формируется фотолитографическим методом (фоторезистивные паяльные маски). Такой способ позволяет формировать рисунок маски любой сложности. Фоторезистивные паяльные маски в последнее время получили наибольшее распространение. Для этих целей применяются сухие и жидкие фоторезистивные материалы.

Размеры окон в маске на платах 3-го и более высоких классов точности должны превышать размеры контактных площадок на небольшую величину - от 0,05 до 0,1 мм. В терминах P-CAD 2001 эта величина называется Solder Mask Swell - расширение паяльной маски и задается при определении стиля контактных площадок и переходных отверстий (в местах расположения любых отверстий диаметром более 0,6 мм в маске необходимо выполнять окна, чтобы пленка маски не повисала над отверстием).

Для получения качественных паяных соединений металлизация на плате должна быть подготовлена соответствующим образом. Используют много способов для нанесения паяемого покрытия на медную поверхность проводников печатных плат. Два наиболее популярных метода - двойная печать фоторезиста и лужение медных проводников с выравниванием припоя горячим воздухом (hot air level – HAL, HASL). В то время как оба метода дают одинаковый конечный результат: чисто медные проводники, покрытые паяльной маской, а все паяемые поверхности покрыты припоем, эти методы значительно отличаются при их реализации.

Двойная печать: первоначальное нанесение резиста определяет рисунок электрической схемы. Впоследствии по рисунку в резисте осаждается медь, и затем олово/свинец. После того, как произведено травление получают защищенные оловом/свинцом цепи и контактные площадки. Далее наносится второй слой резиста, который защищает олово/свинец на контактных площадках (где в дальнейшем будет производится пайка), на остальных проводниках олово/свинец удаляется, чтобы создать чистую медную схему. Затем второй слой фоторезиста удаляется, оставляя чистые медные цепи и покрытые оловом/свинцом контактные площадки. Далее наносится паяльная маска, а олово/свинец затем расплавляется (оплавляется), чтобы создать хорошо паяемые контактные площадки.

Олово/свинец как электроосажденный металл имеет очень пористую поверхность, он склонен к захвату загрязнений, в том числе остатков фоторезиста. К тому же растворы, используемые при удалении резиста, химически реагируют с оловом и в результате изменяют состав сплава. Все эти показатели ведут к низкому выходу годных и ухудшению надежности.

Процесс изготовления ПП HASL методом – нанесение расплавленного припоя на чистые медные контактные площадки плат, незащищенные паяльной маской, аналогичен обычному позитивному методу. Однако после травления меди с пробельных мест удаляется также олово/свинец со всех металлизированных поверхностей и далее паяльная маска наносится на чистые медные проводники. Затем вся плата окунается в расплавленный *SnPb* (63/37) припой, который наносится на все поверхности, свободные от паяльной маски (то есть контактные площадки). При методе "тентинг" после травления рисунка операция снятия металлорезиста отсутствует. Поэтому одно из преимуществ лужения с выравниванием припоя – просто меньше шагов обработки. Другое преимущество – припой не подвергается никакой дополнительной химической обработке, ко-

торая могла бы загрязнить поверхность или изменить состав сплава. Контактные площадки после этого процесса имеют отличную способность к смачиванию расплавленным припоем.

Применяются и другие варианты покрытий, обеспечивающие хорошую паяемость:

а) Иммерсионная или химическая металлизация золотом, серебром, палладием. Применяется в ПП для аппаратуры ответственного назначения. Иммерсионный слой металла имеет способность самоограничения при росте и обычно очень тонкий. Для изготовителя ванны иммерсионной металлизации обычно значительно легче, чем ванны химической металлизации. Толщина слоя золота 0,05-0,2 мкм.

б) органические покрытия, связанные с обработкой меди (составы на основе бензимидазола или имидазола, триазол).

Если на плате имеются контакты электрического соединителя непосредственного контактирования, на эти контакты должно наноситься покрытие, дающее стабильное низкое переходное сопротивление и обладающее высокой износоустойчивостью. В таких случаях применяется многослойное покрытие, в верхнем слое которого наносится золото или палладий. Толщина слоя составляет от 0,5 до 2 мкм. Хотя никель расширяет долговечность золота, его первичная функция – сформировать барьер между золотом и медью. Это предохраняет медь от миграции через пористый золотой слой на поверхность.

С точки зрения популярности чаще всего заказывают следующие покрытия в печатных платах для поверхностного монтажа: выравнивание припоя горячим воздухом (HAL, HASL), оплавление олово/свинца, золото поверх никеля, органическое покрытие, покрытие лаковым флюсом.

Если сравнить лужение с выравниванием припоя горячим воздухом, иммерсионное золото и процессы органического покрытия, то очевидно, что органическое покрытие имеет самый простой процесс.

6.9. ФОТОШАБЛОНЫ ДЛЯ ПП

В процессе фотолитографии изображение рисунка проводников ПП, разработанное на стадии создания конструкторской документации на изделие, должно быть перенесено на защитную маску фото- или металло-резиста в зависимости от типа применяемого процесса для создания ПП. Для переноса изображения предназначены фотошаблоны (ФС), представляющие собой негативное или позитивное отображение конфигурации печатных проводников.

Высокие классы точности ПП, при которых зазоры и ширина проводников ПП составляют $0,05 \div 0,1$ мм, требуют высокой точности выполнения всех операций при изготовлении ПП. Особое место в обеспечении требуемой точности занимают фотошаблоны.

ФС представляет собой слоистую структуру:

- базовый полимерный слой (носитель ФС). Выполнен из полиэстера (ПЭ) или полиэтилена тетрафталата (PTF). Толщина – 180 мкм;

- слой фоточувствительной эмульсии (соединения серебра). Толщина слоя 5 мкм;

- защитный слой на основе желатина. Толщина не превышает 5 мкм. Защищает фоточувствительный слой от повреждений.

Разные свойства этих слоев приводят к изменениям размеров ФШ при воздействии технологических факторов:

- изменения относительной влажности;
- изменения температуры;
- воздействия технологических факторов;
- старения ФШ.

Для современных материалов, применяемых при изготовлении ФШ, старение при правильных условиях хранения ФШ приводит к незначительным изменениям размеров: ПЭ показывает $\pm 0,01\%$ изменений размеров за период до 5 лет. Изменения зависят от режимов хранения: при повышенной влажности возможно легкое коробление ФШ (разбухание), при повышенной температуре возможна легкая усадка порядка $0,02\%$.

Материал основы ФШ поглощает и испаряет влагу из окружающей среды. Поглощение приводит к расширению ФШ. Процесс протекает медленно: за один час приращение толщины составляет порядка 25 мкм, достигая 99%-ного равновесия с окружающей средой. Влажностный коэффициент для ПЭ составляет $0,8 \cdot 10^{-4} \%$ на 1% изменения относительной влажности. От толщины пленки коэффициент не зависит. Защитный и фотоэмульсионный слои также поглощают и испаряют влагу. Это вызывает механические напряжения в тонких приповерхностных слоях ФШ. В желатине защитного слоя процесс поглощения влаги идет гораздо быстрее: равновесие с окружающей средой достигается за 2 – 3 минуты. Чтобы избежать влияния защитного слоя на изменение размеров ФШ, иногда последние выпускают без защитного слоя. Это повышает стабильность его размеров, однако резко ограничивает срок службы из-за механических повреждений фотослоя (царапины и прочее).

С увеличением температуры размеры ФШ увеличиваются, скорость реакции достаточно высока: равновесие достигается за 2 – 3 минуты. ТКЛР для ПЭ составляет $0,0018 \%$ град⁻¹. Процесс обратимый. Однако при нагреве до 60 °С ПЭ начинает непрерывно изменяться, компенсируя производственные напряжения. Амплитуда этих изменений составляет $\pm 0,01\%$ и трудно поддается управлению.

Изменение размеров ФШ происходит также и в ходе самого технологического процесса: уменьшается влажностный коэффициент из-за удаления из основной и защитной пленки части химических составляющих, из светочувствительного слоя в проявитель удаляется неэкспонированное серебро. Амплитуда этих воздействий составляет примерно $\pm 0,02\%$ для 0,18 мм пленки. Влияние процессуального изменения размеров ФШ аналогично сушке. Исползованная пленка имеет меньший влажностный коэффициент, чем новая. Можно было бы рекомендовать предварительную сушку ФШ перед применением, однако условия сушки могут сильно различаться для различных типов полимеров.

Процесс производства полимеров для основы ФШ не является идеальным, поэтому для некоторых пленок может быть характерно неизометрическое изменение размеров в направлении осей X и Y в плоскости шаблона. Различие свойств может составлять до 10%, как указывается в описаниях ФШ фирмы Kodak Company.

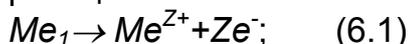
6.10. ПРОЦЕССЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПП

Важнейшим методом нанесения электропроводящих слоев является *химическая (бестоковая) металлизация*. Химической металлизации подвергают в основном диэлектрические материалы: керамику и пластмассу. При этом после соответствующей активации на них осаждают химическим способом проводящий слой толщиной до 3 мкм, а затем его усиливают гальваническим способом до желаемой толщины, так как гальваническое осаждение значительно дешевле. В основном этот метод применяют для осаждения меди и никеля в межслойных переходах ПП при их изготовлении аддитивным методом, а также для декоративной металлизации неметаллических деталей. Кроме того, его применяют для осаждения золота, серебра, цинка и прочих металлов при изготовлении ИМ, причем металл осаждают и на металлические поверхности, если применение гальванического метода затруднено.

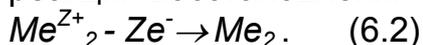
Химическая металлизация основывается на окислительно-восстановительной реакции, при которой необходимые для восстановления катиона металла электроны образуются в результате окисления в водном растворе.

По данным электрохимического ряда напряжений металлов (см. табл. 6.4) можно определить тенденцию металлов к растворению. Чем отрицательнее электродный потенциал, тем интенсивнее растворение. Неблагородный металл (потенциал которого ниже) может выделить благородный из раствора его солей, при этом его поверхность переходит в ионное состояние. В общем случае, обмен электронов можно выразить следующим образом:

реакция окисления

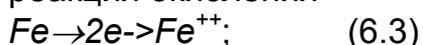


реакция восстановления

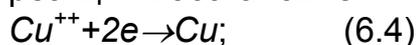


где Me_1 — менее благородный металл, чем Me_2 . Самым известным примером химического осаждения меди является погружение стального стержня в раствор сульфата меди, в результате чего он быстро покрывается тонким слоем меди:

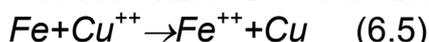
реакция окисления



реакция восстановления



окислительно-восстановительная реакция



При погружении процесс осаждения протекает до тех пор, пока металлизуемая поверхность не покроется сплошным слоем более благородного металла. После этого исчезает разность потенциалов между твердой металлической фазой и раствором и реакция прекращается. Поэтому данный метод позволяет осаждать слои толщиной не более 1 мкм.

Таблица 6.4

Электрохимический ряд напряжений металлов

Электрод	Нормальный потенциал, В	Электрод	Нормальный потенциал, В	Электрод	Нормальный потенциал, В
Au/Au ⁺	+1,70	Fe/Fe ³⁺	-0,036	Ga/Ga ³⁺	-0,53
Au/Au ³⁺	+1,50	Pb/Pb ²⁺	-0,126	Cr/Cr ³⁺	-0,74
Pd/Pd ²⁺	+0,987	Sn/Sn ²⁺	-0,136	Zn/Zn ²⁺	-0,763
Ag/Ag ⁺	+0,7991	Ni/Ni ²⁺	-0,250	Mn/Mn ²⁺	-1,18
Hg/Hg ²⁺	+0,789	Co/Co ²⁺	-0,227	Zr/Zr ⁴⁺	-1,53
Cu/Cu ⁺	+0,521	In/In ³⁺	-0,342	Ti/Ti ²⁺	-1,63
Cu/Cu ²⁺	+0,337	Cd/Cd ²⁺	-0,403	Al/Al ³⁺	-1,66
H/H ⁺	0	Fe/Fe ²⁺	-0,440	Mg/Mg ²⁺	-2,37
				Na/Na ⁺	2,714

Контактная металлизация представляет собой усовершенствованный метод погружения. В ионный раствор Me_2 погружают третий металл Me_3 , который должен быть менее благородным, чем Me_1 . Металлы Me_1 и Me_3 должны быть электрически связаны (рис. 6.6).

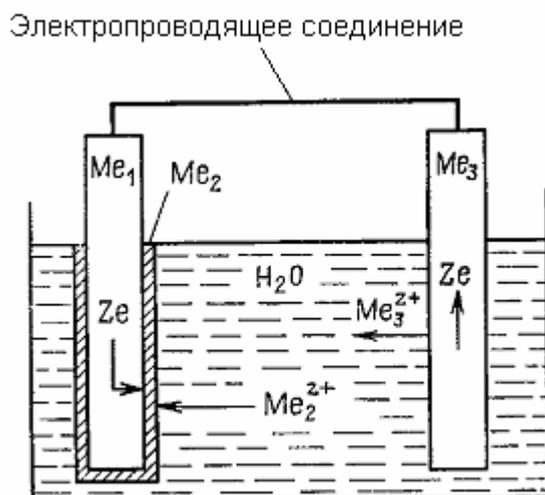


Рис. 6.6. Схема контактной металлизации.

Практическое применение контактной металлизации все же незначительно, так как не всегда удается добиться необходимой разности потенциалов между металлами Me_1 , Me_2 и Me_3 для любой их комбинации, реакционный раствор насыщается другими видами ионов (проблема сточных вод), необходима электропроводящая связь между Me_1 и Me_3 .

В промышленной технологии применяется восстановительное осаждение. При этом необходимые для восстановления ионы металла электроны образуются в результате сложных окислительно-восстановительных реакций, которые протекают на основе добавки

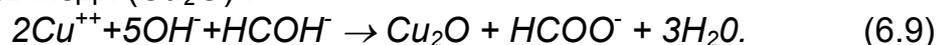
жидких восстановителей в водный раствор, содержащий ионы Me_2 . Происходящие при этом реакции представлены ниже на примере химического осаждения меди и никеля.

Для создания межслойных переходов в ПП и для изготовления плат аддитивным методом используют, как правило, *восстановительную ванну для меднения*. В последнее время рекомендуют применять для получения металлического проводящего слоя также ванны для химического никелирования, которые являются более стабильными и простыми в управлении. Высокопроизводительные восстановительные ванны для меднения позволяют при температуре примерно 50°C осадить слой в 25 мкм в течение 4 ч. Обычный состав восстановительной ванны для меднения:

Сульфат меди $CuSO_4 \cdot 5H_2O$	25 г/л (соль металла)
Сегнетова соль $KMaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$	50 г/л (комплексообразователь)
Раствор едкого натра $NaOH$	33 г/л
Тиосульфат натрия $Na_2S_2O_3$	4 мг/л
Формальдегид $HCHO$	100 мл/л (восстановитель)
Превозель $W-ON33$	0,1 мл /л (смачиватель)

При температуре ванны в $35 - 40^\circ\text{C}$ получают за 30 мин слой меди толщиной 0,5 мкм. Медь восстанавливается в соответствии с уравнением $Cu^{++} + 4OH^- + 2HCOH \rightarrow Cu + 2HCOO^- + H_2 + 2H_2O$. (6.8)

В результате нежелательной побочной реакции может образоваться окись меди (Cu_2O):

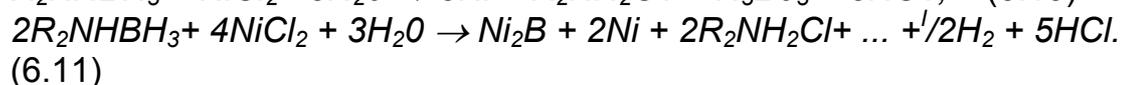


Эту реакцию можно предотвратить, контролируя состояние ванны (концентрацию, температуру и величину pH) и добавляя буферные вещества и комплексообразователи.

Химическое осаждение никеля происходит в ванне, имеющей следующий состав:

- хлорид никеля (соль металла);
- соли уксусной, янтарной и лимонной кислот (буферные вещества, комплексообразователи);
- аминоборан, растворенный в спирте (восстановитель);
- стабилизаторы (предотвращают окислительно-восстановительную реакцию в растворе);
- смачиватели (снижают поверхностное натяжение) .

Такой состав типичен для всех восстановительных ванн. При использовании аминоборана (R_2NHBH_3) для осаждения никеля происходят сложные окислительно-восстановительные реакции, которые можно в упрощенной форме представить следующим образом:



Аминоборан разлагается кислотой:



Эту реакцию предотвращают добавлением буферных веществ, кото-

рые препятствуют изменению величины pH, вызываемому образованием кислот в результате реакций. Кроме того, добавляют стабилизаторы, способствующие тому, что эти реакции происходят только на нужной поверхности, а не в растворе. При температуре 52-54°C, pH=5÷6 и соотношении площади поверхности и объема ванны 1 дм²/л за 7-10 мин образуется слой никеля толщиной в 1 мкм. В ваннах для химического никелирования применяют в качестве восстановителя гипофосфит натрия, причем работают в щелочной или кислой среде.

Химическая металлизация в промышленных условиях чаще всего проводится в установках непрерывного осаждения (рис. 6.7). Применяют также метод орошения. При восстановительном осаждении материал ванны играет большую роль, так как он при определенных условиях тоже покрывается металлом. Поэтому необходима футеровка корпуса ванны пластмассовой пленкой, например из полиэтилена.

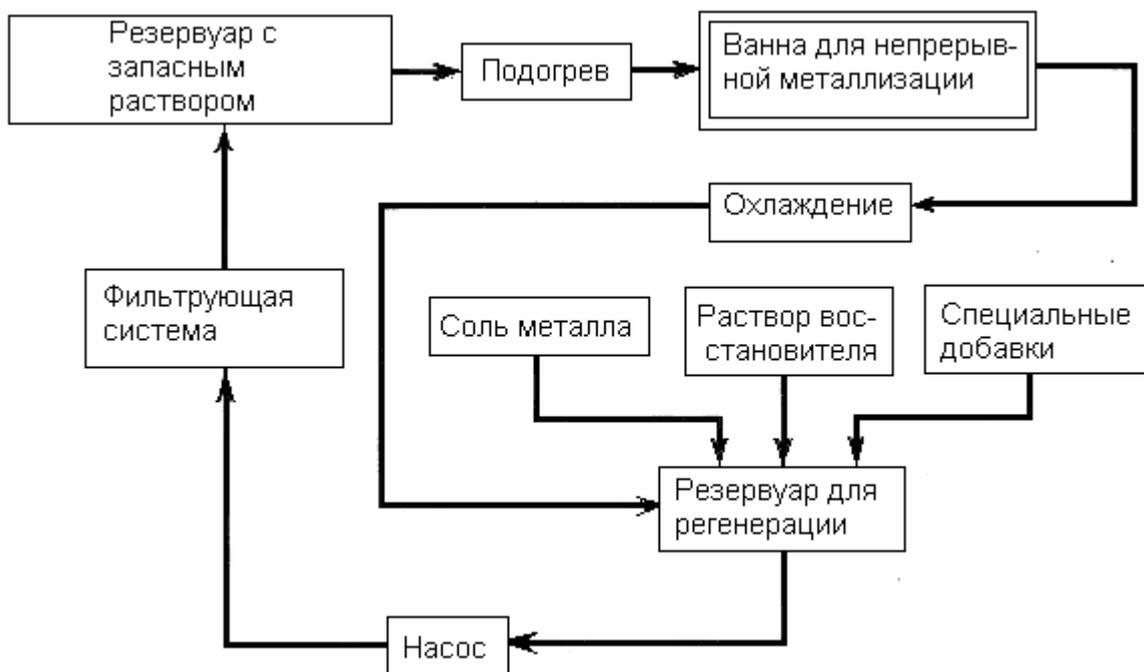


Рис.6.7. Схема установки непрерывного восстановительного осаждения.

При *непрерывном методе* состав ванны поддерживается постоянной регенерацией, благодаря чему качество покрытия также не меняется. Установку для непрерывного покрытия легко ввести в состав автоматической технологической линии.

При методе орошения растворы солей металла и восстановителя смешивают непосредственно перед окислительно-восстановительной реакцией в специальном пистолете-распылителе. При давлении 6 кгс/см² скорость наращивания достигает примерно 0,5 мкм/мин. Способ орошения используют преимущественно для получения слоев серебра, в производстве грампластинок и зеркал. Для соответствующих растворов в литературе приводятся многочисленные рецепты и варианты метода.

Обобщая сказанное, можно констатировать, что практическое при-

менение химической металлизации ограничивается лишь немногими металлами. Причинами этого являются большие трудности подготовки ванны и сложность ее стабилизации. С успехом применяют химическое осаждение меди и никеля при производстве ПП и при металлизации пластмассовых деталей. Помимо этого, используют химическое осаждение серебра, золота и олова в производстве ИМ. Для производства ПП применяют восстановительную металлизацию; предпочтение отдается непрерывному процессу, при этом усилия направлены на разработку более стабильных ванн, которые работают при комнатной температуре и обеспечивают пластичные покрытия. Скорость роста слоя составляет 0,005-1 мкм/мин. Получают слои толщиной от 0,5-40 мкм. Толщина слоя должна быть не меньше 0,2 мкм, иначе покрытие не будет сплошным.

Преимущества восстановительной металлизации:

равномерное распределение толщины слоя на деталях сложной геометрической формы;

меньшая, чем при гальваническом покрытии, пористость;

возможность нанесения покрытий на диэлектрик.

Недостатки восстановительного осаждения:

сложное обслуживание ванн;

низкая стабильность ванн;

невозможность осаждения всех металлов;

трудоемкая предварительная обработка материала основы;

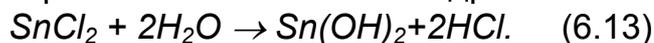
очень высокая стоимость (в 3-4 раза выше, чем при гальваническом осаждении).

6.11. АКТИВАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

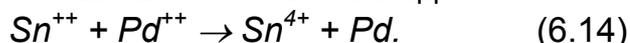
Химическое осаждение металла на поверхность диэлектриков можно проводить после каталитической активации или непосредственно на подготовленные поверхности ПП. При каталитической активации диэлектрики обрабатывают за одну или две ступени.

При *двухступенчатой активации* ПП хорошо очищают в специальных растворах, причем особое внимание обращают на обезжиривание. Если печатные платы имеют отверстия особо малых диаметров, то их необходимо очищать в ультразвуковых ваннах. Следующим шагом при создании МПП является подтравливание. Для создания чистой металлической поверхности внутренние и внешние медные слои подтравливают, например, в персульфате аммония. Это подтравливание придает медным поверхностям шероховатость, улучшающую их сцепление с наносимыми далее слоями. После нескольких травлений поверхность необходимо хорошо промыть, декапировать (это кратковременное травление непосредственно перед дальнейшей обработкой) и, наконец, еще раз промыть. Затем следует первый шаг активации - сенсibilизация. Для этого платы опускают на 2÷3 мин в солянокислый раствор дихлорида олова (10 г/л $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и 40 мл/л HCl концентрированной). Чтобы предотвратить разрушение раствора в результате гидролиза, необходимо

поддерживать высокую концентрацию кислоты. Постепенное разбавление сенсibiliзирующей ванны водой, остающейся на платах после промывки, предотвращают, предварительно погружая заготовку в 10%-ную HCl . Время работы сенсibiliзирующей ванны можно существенно повысить, добавляя в нее гранулы олова. После сенсibiliзации платы промывают в течение 2-3 мин. При этом на их поверхности образуется нерастворимая и несмываемая гидроокись олова:



Часть дихлорида олова образует продукты гидролиза с кислородом ($Sn-O-Sn-O-$), которые адсорбируются на поверхности. Теперь во второй ванне можно проводить непосредственно активацию. Сенсibiliзированные платы погружают при комнатной температуре примерно на 2 мин в солянокислый раствор дихлорида палладия (0,5 г/л $PdCl_2$ и 3 мл/л HCl концентрированной). Адсорбированные на поверхности плат ионы олова восстанавливают ионы палладия:



Атомы палладия являются высокоактивным катализатором для химической металлизации на поверхности диэлектрика. После активации необходимо хорошо промыть заготовки, чтобы не загрязнять ванны химической металлизации. Управление ванной (концентрацией реактивов, величиной pH), чистота ванны (содержание и виды примесей) и степень предварительной очистки плат определяют качество покрытия поверхности палладием, а вместе, с тем качество последующей химической металлизации.

При *одноступенчатой активации* предварительная обработка остается такой же. Одноступенчатая активация проводится в коллоидном растворе, который содержит HCl , катионы Sn^{++} , Sn^{4+} и Pd в коллоидной форме (0,1 - 1 г/л). Наиболее распространенный состав:

Дихлорид олова Sn	50—60 г/л
Дихлорид палладия $PdCl_2$	1 г/л
Концентрированная соляная кислота HCl	300 мл/л

Одноступенчатую активацию проводят при комнатной температуре. Ванну не подвергают регенерации, а эксплуатируют до полной выработки, после чего составляют заново. Для покрытия 100 м² поверхности необходимо примерно 2 г палладия. При одноступенчатой активации в ванне происходят те же процессы, что и при двухступенчатой активации. При погружении ПП в ванну зародыши палладия, как и катионы Sn^{++} и Sn^{4+} , адсорбируются одновременно. При последующей промывке ПП в результате реакции воды с ионами Sn получаются гидроксил-хлориды и четырехвалентные соединения олова. При промывке продукты гидролиза удаляются. Палладий остается адсорбированным и служит катализатором для инициирования химической металлизации.

Наряду с методом активации, основанным на каталитическом действии, известен еще один вариант, при котором адгезия *обеспечивается непосредственным осаждением* на слой смолы. Если слой меди наносится бестоковым осаждением, то на поверхности диэлектрика должен

находиться слой смолы, не армированный стекловолокном, толщиной не менее 50 мкм. Перед осаждением необходима специальная предварительная обработка. Для этого печатные платы погружают в органические растворители, просушивают и протравливают в смеси хромовой и серной кислот. При этом на их поверхностях создаются микронеровности. Затем можно проводить бестоковую металлизацию в обыкновенной восстановительной ванне.

Обобщение технологических операций, которые непосредственно относятся к химической металлизации, указывает на небольшое количество реакций, происходящих в различных химических растворах. Конечным продуктом химической металлизации в результате нанесения покрытия бестоковым способом является готовая печатная плата или промежуточная заготовка, которая затем подвергается гальваническому наращиванию. В этом случае безукоризненная химическая металлизация является основой для хорошего качества гальванического покрытия. Во время гальванического процесса усиливаются не только гладкие поверхности химически осажденного слоя металла, но и все выступы, неровности и прочие дефекты.

Устранение трещин и участков, не покрытых металлом, возможно при гальваническом осаждении только в определенной степени и предполагает особые условия осаждения и состав гальванической ванны.

Насколько многочисленны технологические этапы, относящиеся к химической металлизации и к его подготовке (например, сверление), настолько же многочисленны и источники дефектов, препятствующие образованию безупречного химического слоя металла.

Причиной появления больших пор при химической металлизации могут быть остатки химических растворов, которые задерживаются в микротрещинах диэлектрика после предшествующих процессов очистки и травления.

Другим источником дефектов может быть профиль поверхности, подлежащей покрытию. Каждая неровность, вызванная сверлением, подтравливанием и травлением, покрывается без малейшего эффекта выравнивания. Так как гальванический слой растет преимущественно вертикально, возникают причудливые образования, которые затрудняют установку элементов на печатные платы и пайку. Причиной дефектов являются также пористые образования на стенках отверстия. Они являются продуктами распада материала основы, образующимися при очистке и травлении, или же следствием грубой механической обработки. Эти загрязнения хотя и металлизуются, но вследствие пористой структуры содержат жидкость, которую нельзя удалить. Если эта жидкость выступает позднее (при гальванических процессах, пайке), то возникают дефекты.

6.12. ГАЛЬВАНИЧЕСКАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ

Основой для гальванической металлизации является водный раствор солей металла, содержащий осаждаемый материал в виде поло-

жительно заряженных ионов. Необходимые для восстановления электроны поступают от внешнего источника постоянного тока. Под действием внешнего напряжения ионы металла движутся к катоду, присоединяют электроны и осаждаются на нем как нейтральные атомы. Примером может служить восстановление меди: $Cu^{++} + 2e^- \rightarrow Cu$.

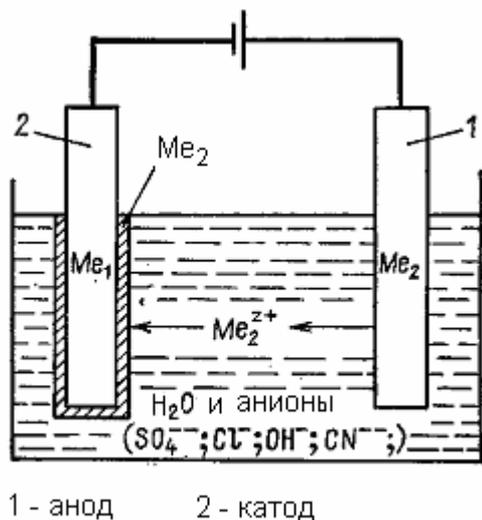


Рис. 6.8. Принцип гальванической металлизации.

На рис. 6.8 показан принцип гальванического осаждения в упрощенной форме. Катодом является предмет, подлежащий покрытию, например ПП. В качестве анода преимущественно используют осаждаемый материал, реже – не растворяющийся платиновый или стальной электрод. Процессы, происходящие на аноде и катоде, имеют сложный характер. Их определяют реакции переноса, проникновения и адсорбции, которые, в свою очередь, зависят от концентрации компонентов ванны и температуры.

Если бы на схеме (рис. 6.8) накоротко замкнули внешний источник тока, то электрически соединенные между собой медные пластины остались бы в растворе сульфата меди. Между раствором и двумя электродами установился бы *равновесный потенциал* ε_1 , который можно вычислить по *уравнению Нернста* (6.20). Внешний источник тока, который превращает систему в гальванический элемент, нарушает равновесный потенциал: потенциал катода смещается в отрицательную сторону, анод, напротив, благодаря приложенному напряжению становится положительнее.

Изменение раствора, соответствующее этому процессу, заключается в повышении концентрации ионов металла в растворе за счет растворения анодного материала. Равномерное прохождение тока, определяющее постоянный коэффициент осаждения, можно обеспечить только в том случае, если на электродах установится концентрация ионов металла, соответствующая приложенному потенциалу. Однако на практике часто возникают условия, при которых невозможно поддерживать постоянную величину концентрации ионов металла, например в случае различия выхода по току анода и катода, или недостаточного перемешивания

ванны, или изменения поверхности электродов. Вызванное этим смещение потенциала на электродах относительно равновесного потенциала называется *концентрационной поляризацией*. Этому явлению лучше всего противодействовать интенсивным перемешиванием ванны (перемешивание, передвижение обрабатываемого изделия, барботаж воздухом). К поляризации приводят, кроме соотношения концентраций, ограниченная скорость реакции в непосредственной близости электродов (реакции переноса и диффузии) и относительно малая скорость диссоциации комплексных ионов металла, например, в ваннах для цианирования



Для преодоления этих препятствий, в известной мере замедляющих электролитическое осаждение, необходимо прикладывать большее напряжение, получившее название *химической поляризации*. Возможность смещения потенциала с помощью комплексообразования в отрицательную сторону является одним из важнейших средств для уравнивания потенциала осаждения различных металлов, что позволяет осаждать их одновременно как сплавы.

Количественно процессы гальванической металлизации описывают законы Фарадея, согласно которым масса вещества m , выделившегося при электролизе, прямо пропорциональна количеству прошедшего электричества It . Осажденные равным количеством электричества массы веществ соотносятся как химические эквиваленты этих веществ (Ae - отношение атомной массы элемента к его валентности). Таким образом,

$$m = Kit, \quad (6.16)$$

где K — теоретический электрохимический эквивалент, определяемый из соотношения

$$K = Ae/F \quad (6.17)$$

где F — постоянная Фарадея, $F = 96500$ Кл/(г-атом).

Для двухвалентной меди $K = 1,186$ г/Кл. На практике теоретический эквивалент достигается очень редко. Электричество расходуется на побочные процессы на электродах, например на соосаждение водорода или кислорода. Отношение действительно осажденной массы к предполагаемой называется *выходом по току* S_j или *катодным коэффициентом* η_k :

$$S_j = \eta_k = m_{\text{действительная}} / m_{\text{предполагаемая}} \cdot 100\% \quad (6.18)$$

Время t , необходимое для нанесения покрытия заданной толщины s , определяют согласно уравнению (6.16), считая $m = \rho_M A_k s$, т. е.

$$t = \rho_M A_k s / K I S_i \quad (6.19)$$

где ρ_M — плотность покрытия; A_k — площадь поверхности катода.

Для ПП поверхность катода вычисляется оптическим путем (например, по чертежу ПП).

Характерным для гальванических покрытий является неравномерность толщины слоя, что зависит от положения обрабатываемой детали относительно анода и от явлений поляризации, которые, проявляясь в критических местах (краях, углах), препятствуют повышению плотности тока, тормозят металлизацию.

Свойство ванны образовывать на катоде ровный по толщине слой покрытия определяют как *рассеивающую способность*. Она тем лучше, чем выше поляризация при осаждении. Поэтому ванны с комплексообразователями (например, цианистые ванны) имеют лучшую рассеивающую способность, чем кислые, так как металлоосаждение в них протекает при повышенной поляризации.

Важнейшей характеристикой гальванического покрытия является его структура. Ее определяют:

- процессы кристаллизации;
- структура металла основы;
- тип электролита и параметры процесса (концентрация, плотность тока, температура, перемешивание ванны);
- выделение водорода или кислорода;
- осаждение металлических, неметаллических, органических коллоидных веществ (блескообразователи).

Типичным для гальванических покрытий является вертикальный рост кристаллов в виде столбиков, причем в ряде случаев они принимают кристаллическую ориентацию подложки. Такая волокнистая структура (текстура роста) нежелательна, так как она может ухудшить механические свойства покрытия.

В РЭА от гальванических покрытий требуется высокая чистота, беспористость, пластичность и равномерная толщина. Для этого непрерывно разрабатываются новые электролиты и процессы. В целях получения специальных физических и химических свойств покрытий осаждению сплавов придается особое значение. Практическое применение находят сплавы *Cu - Sn*, *Sn - Ni*, *Sn - Pb*, *Cu - Zn*, *Ni - Co*, *Fe - Cu*, *Ag - Ni*, а также сплавы золота. Гальванически осажденные сплавы, в отличие от оплавленных, термодинамически не уравновешены и обнаруживают другие свойства, например пониженную коррозионную стойкость. В современной технологии изготовления ПП известны процессы так называемой прямой металлизации, когда осаждение гальванического слоя идет непосредственно на первичный слой, например, Pd, осажденного на поверхность диэлектрика, минуя стадию химической металлизации. Тем не менее, основные реакции, используемые при такой технологии принципиально не отличаются от описанных выше.

6.13. ТРАВЛЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПП

Важнейшей технологической операцией в производстве электронных элементов и функциональных узлов является травление. Под этим понимают химическое разрушение материала под действием газообразных или жидких травителей. Продукты реакции в общем случае удаляются благодаря подвижности травителя. Травление применяется для:

- создания определенного рисунка металлических слоев, расположенных на нетравящем диэлектрике (например, для получения рисунка ПП при субтрактивном методе);

создания мельчайших отверстий микрометрового диапазона в металлической фольге при изготовлении сетчатых трафаретов, масок и фильтров;

изготовления сложных профильных деталей из тонкой жести и металлической фольги (профильное травление);

создания металлически чистых поверхностей для последующего осаждения слоев или контактирования;

создания определенного рельефа поверхности;

удаления изоляционных слоев для частичного обнажения металлических слоев (подтравливание в МПП).

Наиболее часто техника травления применяется для создания рисунка ПП при субтрактивном методе. При этом иногда до 90% металлической фольги, нанесенной на диэлектрик фольгированием или напылением, удаляется, а нужные участки защищаются металлическими или лаковыми слоями, устойчивыми при травлении. В основном подвергают травлению металлы, особенно *Cu* и ее сплавы, *Ni*, сплавы *Ni* и *Cr*, *Al*, *Au*, *Ag*, *Pt*, *Pd*, *Ta*, *Ti*, *Mo*, а также сталь. Кроме того, в производстве электронных элементов необходимо травить полупроводниковые материалы (*Si*, *Ge*) и диэлектрические слои (как правило, SiO_2). Удаления неметаллов стремятся избежать, так как они очень устойчивы при травлении. Имеется всего несколько исключений, например травление стекла и эпоксидной смолы в отверстиях МПП. Факторы, определяющие процесс травления металлов, рассматриваются ниже.

В соответствующих растворителях металлы растворяются и образуют положительно заряженные ионы, например Cu^{++} , или комплексы, например $[Cu(CN)_2]^{++}$.

Тенденцию растворения металла можно выразить через разность потенциалов металла и раствора по отношению к электроду сравнения. Если в качестве электрода сравнения используют равновесный водородный электрод, а противоположным электродом является металл, помещенный в 1 Моль раствора своих ионов, то получают стандартный потенциал. Стандартные потенциалы металлов ε_1 сведены в так называемый электрохимический ряд напряжений металлов (табл. 6.4). Чем отрицательнее потенциал ε , тем активнее металл растворяется. Количественно этот процесс описывается уравнением Нернста:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \frac{R_r T}{ZF} \ln C \quad (6.20)$$

где ε - электродный потенциал; ε_1 - стандартный электродный потенциал; C - концентрация ионов металла; R_r - газовая постоянная; T - абсолютная температура; Z - валентность ионов металла; F - постоянная Фарадея.

Известны три принципа травления металлов: травление с выделением водорода, травление с восстановлением кислорода и травление с образованием комплексов.

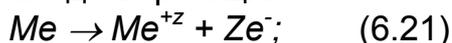
В неокисляющей кислоте металл растворяется с образованием катионов и электронов. При этом на поверхности его возникает двойной

электрический слой, препятствующий дальнейшему растворению. Если электроны поглощаются раствором, то растворение металла продолжается. При этом протекают две реакции: анодная $Me \rightarrow Me^{+z} + Ze^-$ и катодная $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$.

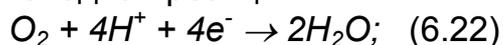
Металлы, потенциал которых положительнее водородного, не могут растворяться по первому принципу, так как не возникает равновесия в системе. Эти металлы разрушаются в травителях, поглощающих электроны вследствие восстановления кислорода, а именно:

в кислых растворах:

анодная реакция

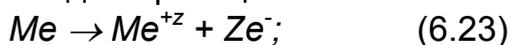


катодная реакция

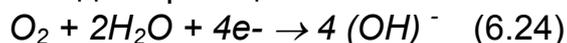


в щелочных растворах:

анодная реакция



катодная реакция



С увеличением концентрации ионов кислорода интенсивность разрушения усиливается. Вследствие этого травители благородных металлов должны содержать окислители или вещества, образующие кислород при вторичных реакциях. Наиболее эффективными являются азотная, хромовая или янтарная кислота, хлорное железо, перекись водорода, персульфаты и соли меди.

Эффективный метод, обеспечивающий растворение благородных металлов, описывается уравнением Нернста (6.20). Благодаря снижению концентрации ионов металла потенциал сдвигается в отрицательную сторону, что приводит к возникновению катодных реакций. Уменьшение концентрации ионов благородных металлов достигается благодаря добавкам к травителю комплексообразователей, например, цианидов, которые связывают ионы благородных металлов в комплексы с наибольшей степенью диссоциации.

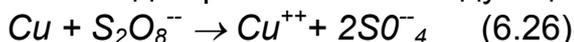
Травление в растворе хлорида железа (III). Хлорид железа (III) благодаря низкой стоимости, универсальности, высокой скорости травления является наиболее распространенным травителем. При содержании: 500 г/л $FeCl_3$, 4-6% HCl и температуре 35-50°C скорость травления меди составляет 50 мкм/мин. Растворение меди происходит в соответствии с реакцией



Если концентрация меди в растворе составит 80 г/л, то он уже непригоден для дальнейшего использования; уже при концентрации 40 г/л скорость травления существенно падает. Очистка и регенерация отработанного травителя требуют больших затрат. Применяют процесс, основанный на металлической связи меди с железными стружками или железным порошком и окислении оставшегося раствора хлором для перевода $FeCl_2$ в $FeCl_3$.

В качестве защитных покрытий используют резисты трафаретной печати и фоторезисты, а в ряде случаев слои *Au* или *Ag*. Покрытие сплавом *SnPb*, а также блестящее лужение неприемлемы, так как они неустойчивы к данному травителю.

Травление в растворе персульфата аммония. В настоящее время все чаще применяют травитель на основе персульфата аммония. Это вызвано необходимостью получения четких границ при травлении, устойчивостью защитных покрытий сплавом *SnPb* эвтектического состава, простотой регенерации и решения проблемы сточных вод. Обычный состав травителя содержит $(NH_4)_2S_2O_8$ 200 г/л, 0,3 - 0,5% H_2SO_4 . При температуре 40 - 50°C и травлении разбрызгиванием скорость травления составляет 10 - 20 мкм/мин, при травлении погружением – 3 - 6 мкм/мин. При содержании меди в растворе 30 г/л скорость травления сильно падает. Новыми разработками предусмотрено добавление в качестве катализатора хлорида ртути, при этом травитель обычно содержит 200 г/л $(NH_4)_2S_2O_8$, 1% H_2SO_4 и 0,05% $HgCl_2$. При использовании персульфата аммония растворение меди протекает по следующему уравнению:



Регенерация основана на выпадении в осадок соединений меди при глубоком охлаждении или в процессе электролиза. Недостатками раствора персульфата аммония являются опасность образования труднорастворимых медных комплексных соединений и небольшие допустимые концентрации меди.

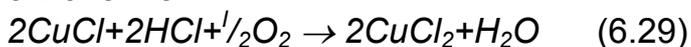
Травление в растворе хлорида меди (II). Однозначное преимущество $CuCl_2$ как травителя, содержащего 150 г/л $CuCl_2$ и 5% HCl , заключается в возможности полной регенерации в закрытой циклической системе. Благодаря этому обеспечивают постоянную скорость травления при неизменной температуре и определенном содержании меди в растворе – 30 г/л. Процесс травления протекает согласно уравнению



Существует несколько способов регенерации раствора $CuCl$: хлорированием



окислением



При температуре 40-60°C и толщине слоя меди 35 мкм время травления составляет 1-3 мин. В качестве защитных покрытий используют резисты трафаретной печати, фоторезисты и слои *Au* и *Ag*. Покрытия на основе сплава *SnPb* и блестящее лужение непригодны.

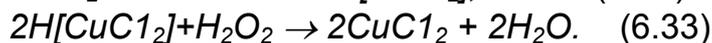
Травление в растворе перекиси водорода. При травлении в растворе перекиси водорода применяются добавки серной или соляной кислоты. В растворе перекиси водорода с серной кислотой (2 - 8% H_2O_2 и 5 - 10% H_2SO_4) протекает реакция



Кроме сульфата меди не образуется других побочных продуктов. Содержание меди в растворе может достигать до 100 г/л. При распыле-

нии используемого раствора медь выпадает в осадок в виде сульфата. В качестве защитных покрытий применяют резисты трафаретной печати, фоторезисты и обычные металлические покрытия (*SnPb*, блестящее лужение, *Au* и *Ag*).

В растворе соляной кислоты перекись водорода обеспечивает непрерывное регенерирование системы, что позволяет осуществлять работу по закрытому циклу:



Простота выделения меди, возможность регенерации и устойчивость практически всех защитных покрытий – преимущества травителей на основе H_2O_2 . Недостатки состоят в необходимости точного контроля ванны вследствие опасности перекиси водорода, резком росте времени травления при накоплении меди в растворе и химическом разрушении металлических емкостей и частей оборудования.

Процесс травления должен быть организован таким образом, чтобы возможное химическое воздействие травителя на травящийся материал было использовано наиболее оптимально. Травильные установки должны обеспечивать:

- движение травителя или заготовки или же их совместное движение;
- аэрацию травителя (оптимальное разбрызгивание);
- температурную стабильность;
- удаление травителя (в ряде случаев с регенерацией);
- промывку, нейтрализацию и сушку заготовки;
- непрерывный процесс при массовом производстве.

Различают травильные установки, в которых травление производится погружением, центрифугированием и разбрызгиванием.

7. ПАЙКА

Пайка представляет собой наиболее распространенный способ монтажа компонентов в производстве радиоэлектронных узлов. При этом обеспечивается одновременно и механическое крепление выводов компонентов (в соответствии со сборочным чертежом узла), и электрическое контактирование в соответствии с электрической принципиальной схемой.

При пайке две металлические детали (или детали, имеющие металлическое покрытие) соединяются при помощи третьего металла (или сплава), называемого припоем. В отличие от сварки, при пайке соединяемые детали не расплавляются сами, расплавляется только припой. Поэтому пайка имеет более щадящий тепловой режим для соединяемых деталей, чем сварка.

Для получения качественного паяного соединения, обладающего хорошими электропроводящими и прочностными свойствами, необходимо обеспечить несколько условий:

1) Получить чистые металлические поверхности у соединяемых деталей (удалить загрязнения и пленки окислов), в том числе на окончательной стадии очистки с помощью флюса – дополнительного технологического материала;

2) Нагреть припой выше точки плавления;

3) Обеспечить вытеснение флюса с помощью наступающего припоя;

4) Обеспечить растекание жидкого припоя по металлической поверхности – процесс смачивания;

5) Обеспечить диффузию атомов из твердой металлической фазы в жидкий припой и наоборот – образование сплавных зон.

Среди припоев в радиоэлектронике наиболее широкое распространение получили припои на основе композиции олова и свинца (ПОС). Диаграмма состояния этой двойной системы приведена на рисунке ниже (рис. 7.1).

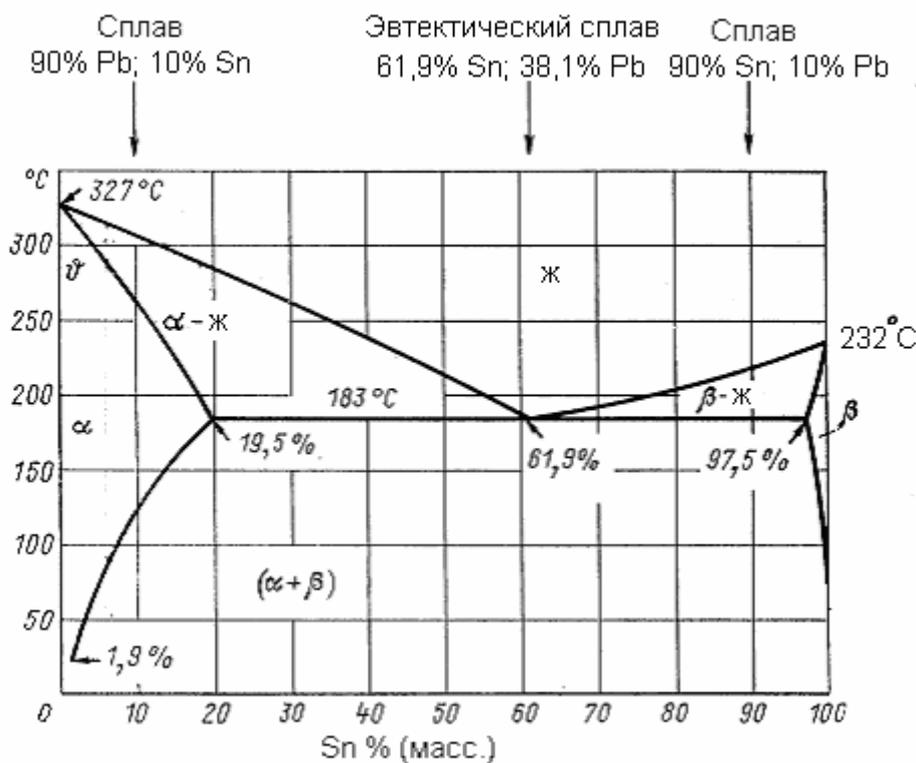


Рис. 7.1. Диаграмма состояния системы *Sn-Pb*.

Как видно из диаграммы, сплав имеет особую точку, называемую точкой эвтектики. В этой точке температура кристаллизации припоя составляет 183 °C, что значительно ниже точек плавления *Sn* и *Pb* (232 °C и 327 °C).

Флюс является неметаллическим материалом, который создает предпосылки для прочной связи на месте пайки. Под воздействием флюса происходит быстрое и совершенное смачивание металлической поверхности соединяемых деталей расплавленным припоем благодаря влиянию сил поверхностного натяжения. Кроме того, флюс обладает свойством растворения и удаления окисных слоев на контактируемых металлах и защиты очищенной поверхности от нового окисления. Остат-

ки флюса должны легко удаляться или быть нейтральными, т.е. не изменять электрические параметры исходного материала и не вызывать коррозии. Наиболее распространены флюсы на основе органических кислот, вырабатываемых из смол хвойных пород деревьев (канифоль). Известно также и большое количество синтетических материалов.

Смачивание как решающий фактор процесса пайки, может улучшаться в основном посредством поверхностно-активных веществ флюсов. Качество смачивания можно определить по краевому углу смачивания Θ (рис. 7.2). Количественные соотношения между поверхностным натяжением, граничными поверхностными натяжениями и краевым углом смачивания даются уравнением Юнга:

$$\cos\Theta = \frac{\sigma_{ТГ} - \sigma_{ТЖ}}{\sigma_{ЖГ}}, \quad (7.1)$$

где $\sigma_{ТГ}$, $\sigma_{ТЖ}$, $\sigma_{ЖГ}$ - граничное поверхностное натяжение между твердой фазой и газом, твердой фазой и жидкостью и жидкостью и газом соответственно.

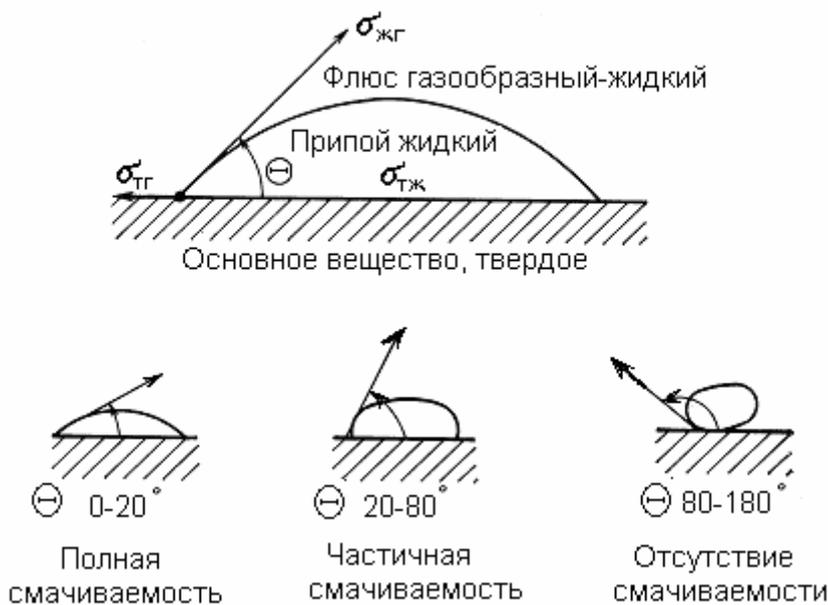


Рис. 7.2. Смачивание твердого вещества.

Отсюда ясно, что уменьшение поверхностного натяжения припоя в расплавленном состоянии приводит к уменьшению угла смачивания. Именно в процессе смачивания создаются условия (наряду с высокой температурой) для создания диффузионных сплавных зон на границах раздела припоя и соединяемых металлов. Диффузионные зоны в конечном итоге определяют прочностные характеристики паяного соединения. Зачастую бывает так, что прочность диффузионных сплавных зон превышает прочность соединяемых металлов.

Современное сборочное производство характеризуется большим разнообразием применяемых технологических материалов (припоев и флюсов) в зависимости от типа применяемых компонентов, материалов,

процессов, условий эксплуатации и прочих причин.

В последнее время активно набирает силу движение за исключение свинца как токсичного металла из электронныхборок. В поисках сплавов на замену традиционной композиции *SnPb* исследовано большое количество материалов, выдано более ста патентов на припои различного состава без свинца, однако абсолютно равноценной замены пока не найдено. ПОС обладает практически оптимальными свойствами для РЭА: хорошей смачиваемостью, прочностью, пластичностью, удобной точкой плавления, коррозионной стойкостью, усталостной прочностью, и, наконец, стоимостью. Наиболее близкими по отдельным свойствам являются следующие припои: *Sn95,5/Ag3,8/Cu0,7* с точкой плавления 217°C, *Sn99,3/Cu0,7* с точкой плавления 221°C и *Sn96,5/Ag3,5* с точкой плавления 227°C. Тем не менее, можно не сомневаться, что рано или поздно поиски увенчаются успехом, поскольку такой фактор, как экологичность аппаратуры, станет дополнительным козырем на рынке и покупатель сделает выбор в пользу бессвинцовой продукции.

Учет особенностей пайки на стадии проектирования изделий в сочетании с контролем режима процесса пайки снижает частоту появления дефектов на этапе пайки и очистки изделий до уровня $(50-5000) \times 10^{-6}$ на одно изделие.

Появление на ПП поверхностно монтируемых компонентов существенно изменило технологию пайки. Пайка волной припоя была внедрена в 50-х гг. и до настоящего времени является единственным групповым методом пайки компонентов, устанавливаемых в отверстия ПП. Пайка волной припоя выполняется чаще всего погружением обратной стороны платы с выступающими выводами в ванну с припоем. Для пайки плат со смешанным монтажом (компоненты, монтируемые в отверстия с одной стороны платы и простые, монтируемые на поверхность с другой) был разработан метод пайки двойной волной припоя.

Для пайки поверхностно монтируемых компонентов была разработана технология оплавления дозированного припоя. Методами трафаретной печати припой в виде пасты наносится на контактные площадки ПП, затем на него устанавливаются компоненты. В ряде случаев припойную пасту просушивают после нанесения с целью удаления из ее состава летучих ингредиентов или предотвращения смещения компонентов непосредственно перед пайкой. Оплавление припоя и получение паяных соединений происходит в нагревательном устройстве. Такая техника пайки применима к ПП с набором поверхностно монтируемых компонентов любых типов.

В 1973 г. появилась пайка в парогазовой фазе (ПГФ), когда фирма DuPont разработала и запатентовала специальные жидкие материалы, имеющие температуру кипения 215°C. С 1983 г. основным конкурентом пайки в ПГФ стала пайка расплавлением дозированного припоя с помощью инфракрасного нагрева (ИК-пайка), примерно с этого же времени развивается пайка в конвекционных печах.

В Японии пайка компонентов, устанавливаемых на поверхность не-

дорогих плат с низкой плотностью монтажа, производится с применением нагретого инструмента. Для чувствительных к тепловому воздействию и сложных микросборок с поверхностным монтажом ведущими японскими компаниями была разработана и реализована лазерная пайка.

Ведущие поставщики сборочно-монтажного оборудования обычно включают установки для пайки в состав выпускаемых производственных линий.

7.1. ПАЙКА ВОЛНОЙ ПРИПОЯ

Пайка волной припоя применяется только для пайки компонентов в отверстиях плат (традиционная технология), хотя некоторые изготовители утверждают, что с ее помощью можно производить пайку поверхностно монтируемых компонентов с несложной конструкцией корпусов, устанавливаемых на одной из сторон ПП.

Процесс пайки прост. Платы, установленные на транспортере, подвергаются предварительному нагреву, исключаящему тепловой удар на этапе пайки. Затем плата проходит над волной припоя. Сама волна, ее форма и динамические характеристики являются наиболее важными параметрами оборудования для пайки. С помощью сопла можно менять форму волны. В настоящее время каждый производитель использует свою собственную форму волны (в виде греческой буквы «омега», Z-образную, T-образную и др.). Могут варьироваться направление и скорость движения потока припоя, достигающего платы, но они должны быть одинаковы по всей ширине волны. Регулируется также угол наклона транспортера для плат. Некоторые установки для пайки оборудуются дешунтирующим воздушным ножом, который обеспечивает уменьшение количества перемычек припоя. Нож располагается сразу же за участком прохождения волны припоя и включается в работу, когда припой находится еще в расплавленном состоянии на ПП. Узкий поток нагретого воздуха, движущийся с высокой скоростью, уносит с собой излишки припоя, тем самым разрушая перемычки и способствуя удалению излишков припоя.

Когда впервые появились ПП, с обратной стороны которых устанавливались поверхностные компоненты, их пайка производилась волной припоя. При этом возникло множество проблем, связанных как с конструкцией плат, так и с особенностями процесса пайки, а именно: непропаи и отсутствие галтелей припоя из-за эффекта затенения другими компонентами, преграждающими доступ волны припоя к соответствующим контактным площадкам, а также наличие полостей с захваченными газообразными продуктами разложения флюса, мешающих доступу припоя.

Совершенствование конструкции платы оказалось недостаточным для достижения высокого уровня годных при традиционных способах изготовления изделий с простыми компонентами, монтируемыми на поверхность обратной стороны плат. Потребовалось изменить технологический процесс пайки волной, внедрив вторую волну припоя. Первая волна делается турбулентной и узкой, она исходит из сопла под большим

давлением (рис. 7.3).

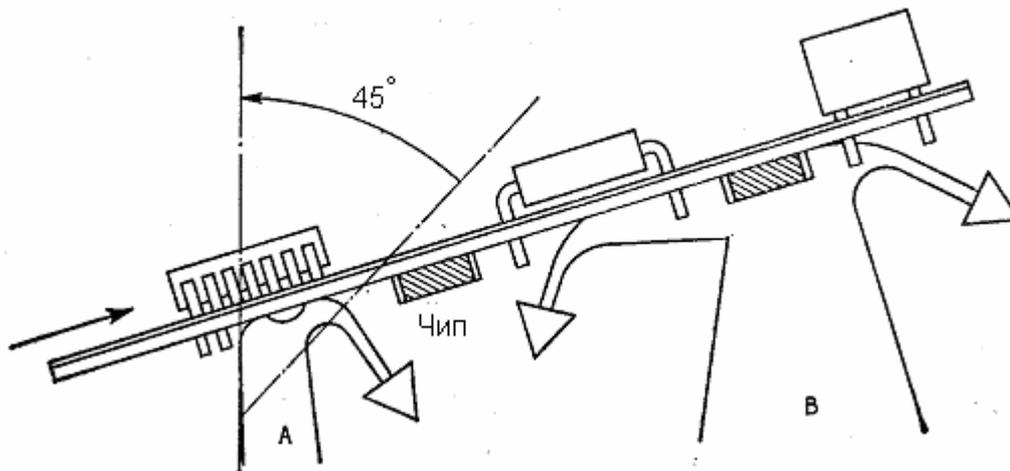


Рис. 7.3. Схема процесса пайки двойной волной припоя. А – первая волна, В – вторая Т-образная волна.

Турбулентность и высокое давление потока припоя исключает формирование полостей с газообразными продуктами разложения флюса. Однако турбулентная волна все же образует перемычки припоя, которые разрушаются второй, более полой ламинарной волной с малой скоростью истечения. Вторая волна обладает очищающей способностью и устраняет перемычки припоя, а также завершает формирование галтелей. Для обеспечения эффективности пайки все параметры каждой волны должны быть регулируемыми. Поэтому установки для пайки двойной волной должны иметь отдельные насосы, сопла, а также блоки управления для каждой волны.

Пайка двойной волной припоя применяется в настоящее время для одного типа ПП: с традиционными компонентами на лицевой стороне и монтируемыми на поверхность простыми компонентами (чипами и транзисторами) на обратной. Некоторые компоненты для ТПМК (даже пассивные) могут быть повреждены при погружении в припой во время пайки. Поэтому важно учитывать их термостойкость. Если пайка двойной волной применяется для монтажа плат с установленными на их поверхности компонентами сложной структуры, необходимы некоторые предосторожности:

- применять поверхностно монтируемые ИС, не чувствительные к тепловому воздействию;
- снизить скорость транспортера;
- проектировать ПП таким образом, чтобы исключить эффект затенения.

Хорошо разнесенные, не загораживающие друг друга компоненты способствуют попаданию припоя на каждый требуемый участок платы, но при этом снижается плотность монтажа. При высокой плотности монтажа, которую позволяет реализовать ТПМК, с помощью данного метода практически невозможно пропаять поверхностно монтируемые компоненты с

четырехсторонней разводкой выводов.

7.2. ПАЙКА В ПАРОГАЗОВОЙ ФАЗЕ (ПГФ)

Пайка расплавлением дозированного припоя применима только к сборкам с поверхностным монтажом.

Суть процесса: специальная жидкость нагревается до кипения, затем ее пары конденсируются на ПП, отдавая скрытую теплоту парообразования открытым участкам сборки. При этом припойная паста расплавляется и образуется паяное соединение между выводом компонента и контактной площадкой платы. Когда температура платы достигает температуры жидкости, процесс конденсации прекращается, тем самым заканчивается и нагрев пасты. Повышение температуры платы от ее начальной температуры до температуры расплавления припоя осуществляется очень быстро и не поддается регулированию (рис. 7.4).

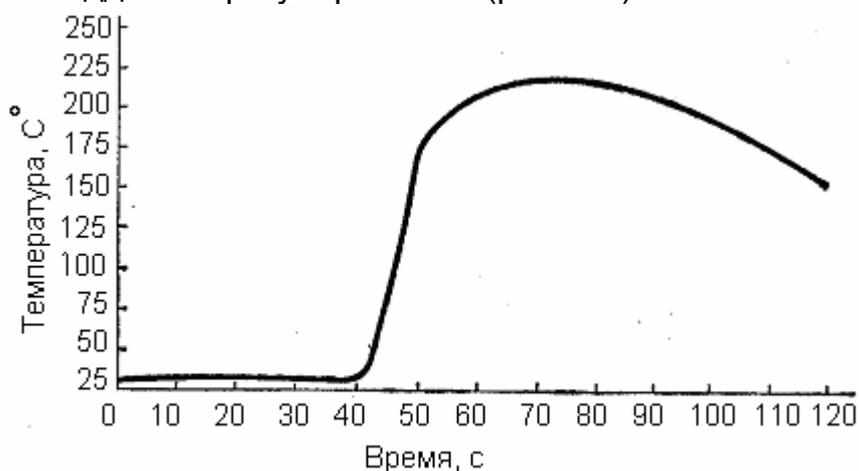


Рис. 7.4. Температурно-временной режим для пайки в ПГФ.

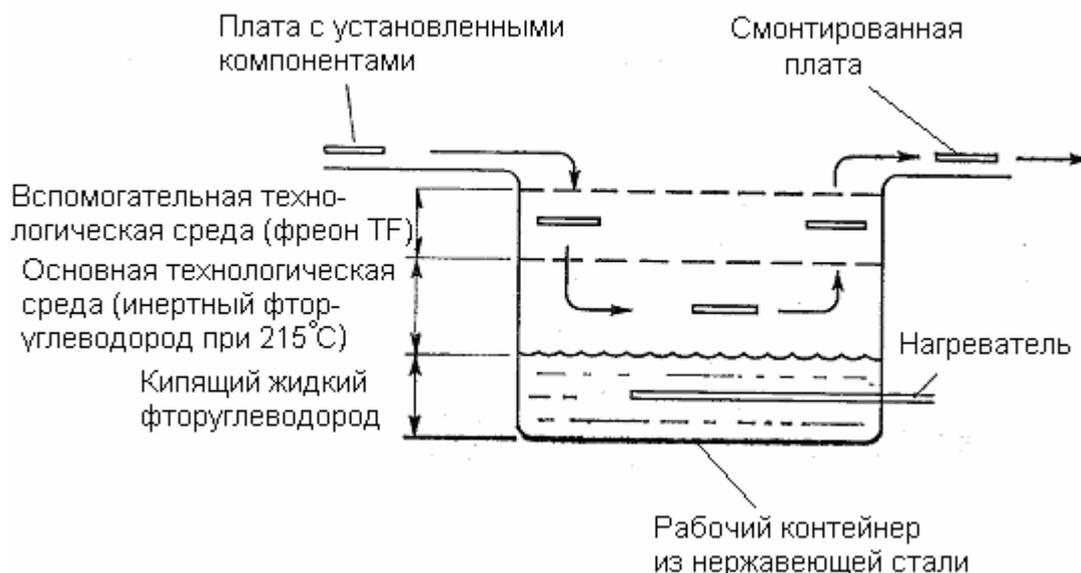


Рис. 7.5. Схема процесса пайки в ПГФ с двумя технологическими средами.

Поэтому необходим предварительный подогрев платы с компонентами для уменьшения термических напряжений в компонентах и местах

их контактов с платой. Температура расплавления припоя также не регулируется и равна температуре кипения используемой при пайке жидкости. Такой жидкостью является инертный фторуглерод (например, FC-70).

Существуют два типа установок для пайки в парогазовой фазе: с применением одной либо двух рабочих жидкостей. В первых установках для пайки в ПГФ применялись две рабочих жидкости (рис. 7.5). С целью предотвращения утечки паров дорогого фторуглерода и припоя поверх основной технологической среды из инертного фторуглерода создавалась дополнительная технологическая среда из более дешевого фреона. Основным недостатком этих установок состоял в том, что на границе двух технологических сред происходило образование различных кислот. Поэтому для защиты ПП требовались системы нейтрализации кислот.

С 1981 г. стали выпускаться установки для пайки в ПГФ конвейерного типа, встраиваемые в технологические сборочно-монтажные линии. Такие установки имеют относительно небольшие входное и выходное отверстия, позволяющие реализовать систему с одной технологической средой (рис. 7.6).

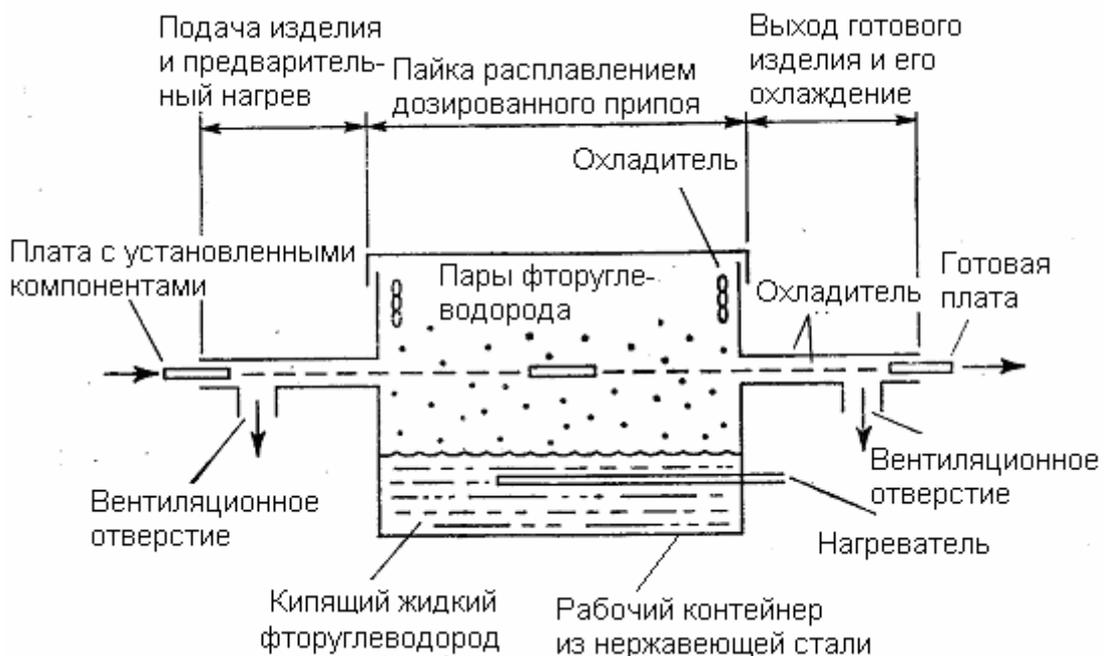


Рис. 7.6. Схема процесса пайки в ПГФ с одной технологической средой.

7.3. ПАЙКА ИНФРАКРАСНЫМ НАГРЕВОМ (ИК-ПАЙКА)

Процесс пайки компонентов, собранных на ПП, с помощью ИК-нагрева аналогичен пайке в ПГФ, за исключением того, что нагрев платы с компонентами производится не парами жидкости, а ИК-излучением.

Основным механизмом передачи тепла, используемым в установках пайки с ИК-нагревом, является излучение. В отличие от пайки в ПГФ, в процессе пайки с ИК-излучением скорость нагрева регулируется изменением мощности каждого излучателя и скорости движения транспортера с ПП. Поэтому термические напряжения в компонентах и платах могут быть

снижены посредством постепенного нагрева сборок (рис. 7.7).

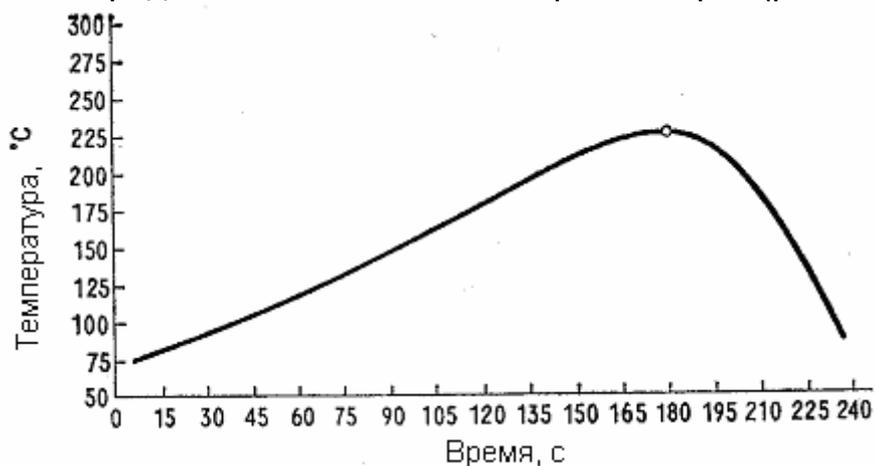


Рис. 7.7. Температурно-временной режим для пайки ИК-нагревом.

Инфракрасные печи имеют низкую цену и применяются при изготовлении несложных плат. Обусловлено это тем, что инфракрасный тип нагрева имеет целый ряд отрицательных эффектов. Наиболее существенно влияют на работу следующие:

- количество энергии излучения, поглощаемой компонентами и платами, зависит от поглощающей способности материалов, из которых они изготовлены. Поэтому нагрев осуществляется неравномерно в пределах монтируемого устройства;

- теневой эффект. Высокие элементы могут закрывать более низкие, создавая так называемую «тень», то есть зону, где высока вероятность непропая. Также некоторые элементы могут закрывать свои собственные выводы (кристаллоносители без выводов или с J-образными выводами).

В некоторых установках для пайки с ИК-нагревом вместо ламп ИК-излучения применяются панельные излучающие системы. В этом случае излучение имеет намного большую длину волны, чем излучение традиционных источников. Излучение такой системы не нагревает непосредственно компоненты на сборке, а поглощается технологической средой (воздух или газ), которая в свою очередь передает тепло за счет конвекции. Этот способ пайки устраняет ряд недостатков, присущих традиционной пайке с ИК-нагревом, таких, как неравномерный прогрев отдельных частей сборки и невозможность пайки компонентов в корпусах, непрозрачных для ИК-излучения. Панельные излучатели обеспечивают намного меньшую скорость нагрева, чем традиционные источники ИК-излучения.

7.4. КОНВЕКЦИОННАЯ ПАЙКА

Конвекционные печи лишены недостатков, связанных с теплопередачей излучением. Но управлять горячим воздухом труднее и выполнять это технически также сложнее. Поэтому конвекционные печи имеют цену значительно выше, чем ИК-установки.

Конвекционная пайка реализуется в камерных или конвейерных печах. Камерные печи используются в лабораторных условиях, в единичном или мелкосерийном производстве. Конвейерные печи встраиваются

с сборочные линии и используются, как правило, в крупносерийном производстве.

В камерных печах отработка профиля пайки осуществляется путем изменения температуры внутри камеры со временем, в конвейерных – перемещением платы по конвейеру через несколько зон печи (зоны нагрева и охлаждения). Как правило, максимальная температура, при которой происходит непосредственно оплавление пасты, составляет 210÷220 °С. Плата находится в печи при максимальной температуре в течение всего нескольких секунд, после чего производится ее охлаждение.

В ряде случаев применяется пайка в инертной среде, при которой осуществляется впуск азота в рабочую область печи. Эта операция используется для сведения к минимуму окислительного процесса. Однако необходимо проанализировать целесообразность этой операции. В случае если процесс пайки длится не очень продолжительный промежуток времени (4÷5 минут), припой просто не успеет окислиться, так как в его состав входит флюс, обеспечивающий растворение окислов на поверхности частиц порошка припоя. К тому же пайка в инертной среде требует большого расхода азота, что повлечет за собой использование азотной станции, а это означает существенные дополнительные расходы.

Использование азотной среды при конвекционной пайке оправдано только в условиях серийного производства при изготовлении сложных модулей, требующих высокого качества исполнения. Приведем значение некоторых ключевых параметров печей конвекционной пайки.

Для конвейерных печей имеет значение ширина конвейера (до 460 мм), для камерных – площадь рабочей области (до 350х500 мм). Максимальная рабочая температура может достигать 350 °С. Количество зон колеблется от 3 зон нагрева и 1 зоны охлаждения в небольших печах, применяемых в мелкосерийном производстве, до 12 зон нагрева и 4 зон охлаждения в больших промышленных установках. Длина печи может быть от 1 до 6 метров.

Вместе с печью оплавления может поставляться программное обеспечение (ПО), позволяющее сохранять и вызывать файлы с температурными профилями процессов пайки для различных типов модулей, которые могут быть реализованы на данной установке. Кроме того, возможно выполнение следующих функций:

- сбор и хранение информации о параметрах паячного процесса;
- контроль заданного температурного режима;
- создание системы подсказок.

7.5. ДРУГИЕ МЕТОДЫ ПАЙКИ

Метод пайки расплавлением дозированного припоя с помощью нагретого приспособления был разработан в Японии применительно к изделиям бытовой электроники с невысокой плотностью монтажа. Суть метода такова: ПП с компонентами помещается на теплопроводящий

транспортёр, содержащий набор специальных пластин, температура которых контролируется. Пластины подбираются по габаритам компонента, прижимают выводы к контактным площадкам и передают тепло для оплавления припоя. Этот метод рекомендован к применению для пайки TAB корпусов и flat-pack, имеющих весьма тонкие выводы, подверженные изгибанию. Применение горячего прижимающего инструмента устраняет проблему копланарности выводов и платы. Во время прижима осуществляется разогрев соединения до точки оплавления припоя по запланированному графику, а затем идет процесс охлаждения паяного контакта, и только затем убирается инструмент. Процесс последовательный, достаточно медленный, однако обеспечивает надежную пайку для ответственных и дорогих деталей.

Пайка расплавлением дозированного припоя с помощью лазерного излучения также является последовательным процессом. Для нагрева соединений при лазерной пайке применяются твердотельные лазеры (на алюмоиттриевом гранате) либо газовые лазеры (на CO_2). Главное достоинство лазерной пайки заключается в том, что пучок лазерной энергии хорошо фокусируется, поэтому данный метод особенно эффективен для пайки термочувствительных компонентов и компонентов с малым шагом выводов. Некоторые из наиболее сложных сборок на платах (например, центральные процессоры вычислительных машин) размером 254x305 мм могут иметь до 10000÷15000 паяных соединений. Главным здесь является качество и надежность паяных соединений, а не производительность установки, поэтому при такой плотности монтажа иногда отказываются от методов пайки расплавлением дозированного припоя.

Роботизированные установки лазерной пайки были изготовлены фирмами Hitachi, Fuji, NEC и Toshiba. Типичный модуль для такого способа пайки имеет сдвоенную паяльную головку в составе робота, работающего в декартовой системе координат. Передача лазерного пучка осуществляется по оптоволоконной линии. Разложение лазерного луча с помощью оптических зеркал делает возможной групповую пайку выводов компонента на плате одновременно по обеим сторонам корпуса SO или кристаллоносителя.

На качество паяных соединений узла влияет множество факторов, в том числе и выбранный конструктором узла вариант размещения компонентов. Современные корпуса для больших и сверхбольших интегральных микросхем изготавливаются из материалов, которые должны обеспечивать хороший теплоотвод от корпуса ИМ в процессе эксплуатации (см. табл. 7.1).

Таблица 7.1.

Тип корпуса	Тепловое сопротивление корпус-плата	Масса корпуса	Длина корпуса	Максимум температуры
32 вывода TSOP	20 °C /Вт	0,37 г	20 мм	220 °C
32 вывода PLCC	27 °C /Вт	1,1 г	15 мм	208 °C

68 выводов PLCC	12 °C /Вт	4,8 г	26 мм	194 °C
208 выводов PQFP	8,5 °C /Вт	6,2 г	57 мм	191 °C
208 выводов H-PQFP	1 °C /Вт	11,0 г	31 мм	187 °C

Низкое тепловое сопротивление корпуса, большая масса и теплоемкость крупных корпусов не позволяют получить одинаковую температуру в области выводов при пайке малых и больших корпусов, расположенных на плате в непосредственной близости. На рис. 7.8 приведены графики разогрева различных корпусов. Хорошо видно, что в то время, как 32-выводной пластмассовый корпус TSOP достиг пика температуры в 210°C, контакты корпуса H-PQFP с 208 выводами успели прогреться только до 150°C.

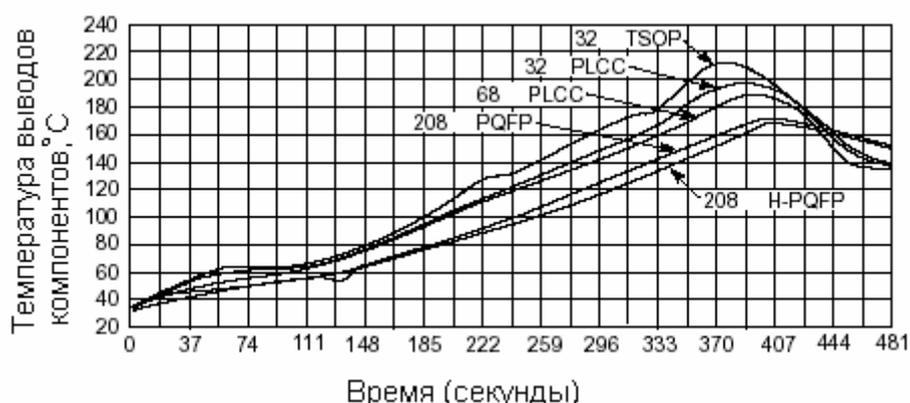


Рис. 7.8. Различия температуры выводов корпусов ИМ при пайке.

Такой эффект необходимо иметь в виду и технологу, и конструктору.

8. ПРИПОЙНАЯ ПАСТА

Для нанесения методом трафаретной печати через металлический трафарет или для нанесения дозатором разрабатываются различные варианты паяльных паст.

Характеристики припойных паст в первую очередь определяются их составом.

Припойные пасты, как правило, представляют собой смесь мелкодисперсного порошка материала припоя со связующей жидкой основой, в которую входит флюс. Содержание порошка припоя составляет приблизительно 88% от веса всей смеси (обычно этот показатель меняется в пределах от 85 до 92%). Чаще всего состав припойных паст выражают через соотношение ингредиентов материала припоя. Так, например, 63/37 означает содержание в составе материала припоя 63% олова и 37% свинца, а 62/36/2 – 62% олова, 36% свинца и 2% серебра.

Характеристики частиц материала припоя в припойной пасте оказывают существенное влияние на качество паяного соединения. Наиболее важным параметром, характеризующим припойный материал, является размер частиц припоя, который выражается в мешах (единицах измере-

ний при классификации номеров сит). Так, -200/+325 означает припойную пасту, частицы которой проходят через сито номер 200, но не проходят через сито номер 325 после предварительного удаления крупнодисперсных частиц, т. е. их размер лежит в диапазоне 44÷74 мкм. Если припойная паста наносится на ПП через сеточный трафарет, рекомендуется применять припойную пасту, у которой максимальный размер частиц припоя составляет половину размера ячейки трафарета.

Форма частиц материала припоя также оказывает существенное влияние на процесс трафаретной печати; считается, например, что использование в составе паст частиц припоя сферической формы облегчает процесс трафаретной печати, в то время как наличие частиц другой, отличной от сферической, формы может способствовать появлению загрязнений (например, трафарета), затрудняющих процесс печати. Частицы неправильной формы могут, кроме того, способствовать ускорению процессов окисления материалов припоя. Пульверизация расплавленного припоя, с помощью которой наиболее просто получить порошкообразные припои, образует частицы преимущественно сферической формы. Использование паст со сферическими частицами припоя позволяет достичь требуемую воспроизводимость технологического процесса от одной партии изделий к другой при формировании рисунка припойной пасты.

Флюс в составе припойных паст служит не только для активации контактируемых металлических поверхностей, удаления с них окислов и предотвращения окисления припоя в процессе пайки (что необходимо для создания паяного соединения), но и обеспечивает требуемую растекаемость (*реологию*), а также изменение вязкости со временем (*тиксотропность*) при нанесении припойной пасты на ПП. Если состав припойной пасты имеет недостаточную вязкость, она будет растекаться, или «расползаться», что, несомненно, приведет к потере точности рисунка, обеспечиваемой трафаретом, а это в свою очередь может послужить причиной образования шариков припоя или перемычек в процессе пайки. Кроме того, количество припойной пасты, нанесенной на плату, в ряде мест может оказаться недостаточным из-за ее растекания по плате.

Для уменьшения растекания припойной пасты можно увеличить процентное содержание в ней порошка припоя. Можно также изменить химический состав флюса путем введения в него специальных вяжущих добавок (загустителей), но здесь нужно соблюдать меру, ибо в противном случае может произойти закупорка сопла дозатора или ячеек трафарета.

Флюс должен удалять окислы с контактируемых металлических поверхностей при пайке. Для эффективного протекания этого процесса очень важно правильно выбрать необходимый температурно-временной режим пайки (температурный профиль). Если во время разогрева платы температура повышается слишком быстро, то растворитель, входящий в припойную пасту в составе флюса, сразу испаряется, что приводит к потере активности флюса и разложению или выгоранию его компонентов; при этом расплавление припоя осуществляется неравномерно, а процесс пайки - непредсказуемо. Если же нагревательный цикл завершен преж-

двух одновременно, то окислы в местах паяных соединений могут быть не полностью удалены. Формирование слоя припойной пасты рекомендуется производить в химически инертной атмосфере (для избежания окисления припоя). Некоторые сборочно-монтажные системы разработаны с учетом этой возможности.

Хранение пасты рекомендуется осуществлять в прохладном месте с температурой от +5 до +10°C. Идеально для этих целей подходят условия холодильника, тем не менее, следует избегать температуры хранения ниже +5°C и выше +25°C. Минимальный срок хранения паяльной пасты с флюсом при температуре +5...+10°C составляет 6 месяцев с даты производства.

Перед применением емкость с пастой необходимо выдержать при комнатной температуре до полной стабилизации в течение 2÷8 часов. Не рекомендуется открывать холодную емкость, это может вызвать конденсацию влаги и ухудшение параметров паяльной пасты. Категорически не допускается дополнительный подогрев пасты нагревательными приборами. Как правило, паяльные пасты с флюсом полностью готовы к применению и не требуют применения дополнительных разбавителей.

Паяльная паста, которая не была использована в течение рабочей смены, не должна смешиваться со свежей пастой. Остатки пасты рекомендуется складывать в отдельную тару и использовать в начале следующей смены. Не рекомендуется использовать пасту, которая находилась на трафарете две рабочих смены. Если устройство трафаретной печати не использовалось в течение четырех часов, рекомендуется произвести полную очистку трафарета от остатков паяльной пасты и продолжить работу.

Распространенными материалами выводов или внешних контактов электронных компонентов являются золото, серебро, палладий-серебро, медь, а также луженая медь, и припойная паста должна выбираться таким образом, чтобы исключить выщелачивание этих материалов в местах пайки и повысить надежность паяного соединения.

Большинство паяльных паст с флюсом обладают хорошими клеящими свойствами, достаточными для удержания компонентов после установки до пайки в течение до 8 часов. Клеящие свойства пасты зависят от условий окружающей среды: температуры и влажности, поэтому рекомендуется произвести испытания для определения максимального времени удержания пастой компонентов в условиях реального производства.

Печатные платы могут быть запаяны в течение 24 часов после нанесения паяльной пасты без ухудшения качества пайки. Тем не менее, высокая температура и влажность могут сокращать это время.

Рекомендуемые режимы процесса пайки для наиболее популярных сплавов $Sn62/Pb36/Ag2$ и $Sn63/Pb37$, входящих в состав паст, таковы:

1) стадия предварительного нагрева от 20°C до 140°C, скорость нагрева 1°C/сек в течение 120 сек.;

2) стадия предварительной сушки от 140°C до 160°C, скорость нагрева 0,5°C/сек в течение 40 сек.;

3) стадия пайки от 16°C 0 до 215°C, скорость нагрева 2°C/сек в течение 33 сек.

Таким образом, минимальное время процесса пайки составляет 193 сек.

Более длительное время стадии пайки может улучшить качество паяного соединения, уменьшить количество и сделать более инертными остатки флюса после пайки. Более короткое время пайки может также дать хорошие результаты, однако в этом случае возможно увеличение количества остатков флюса после пайки. Специалисты фирмы SOBAR рекомендуют обеспечить время выдержки выше температуры плавления (время которое расплавленный припой находится выше точки ликвидуса - +183°C) в пределах от 30 до 60 сек.

Минимальная пиковая температура в зоне пайки должна быть не менее 210°C в течение 5 сек.

Увеличение скорости повышения температуры на стадии предварительного нагрева может привести к увеличению остатков флюса после пайки и ухудшению внешнего вида паяного соединения. Этот косметический дефект полностью устраняется при отмывке остатков флюса.

Вышеуказанные рекомендации служат для первоначальной установки режимов пайки. Конкретные режимы пайки определяются технологом исходя из конструкции печатной платы и оборудования для пайки.

8.1. ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ПРИПОЙНОЙ ПАСТЫ

Процесс нанесения паяльной пасты зависит от большого числа составляющих:

- от характеристик оборудования – принтеров, держателей плат и др.;

- от трафаретов – формы и размеров отверстий, качества стенок отверстий, толщины трафарета;

- от параметров процесса нанесения пасты – скорости, угла атаки, давления и жесткости ракеля, скорости отделения трафарета, зазора между трафаретом и платой;

- от припойной пасты – размера частиц, объемного содержания металла, вязкости пасты, подвижности флюса;

- от параметров рабочего помещения – температуры, влажности, пыли;

- наконец, от опытности оператора.

Припойная паста может наноситься различными способами: с помощью механических устройств для трафаретной печати (ручной способ), с помощью автоматических принтеров, с помощью дозаторов.

Дозаторы – устройства последовательной обработки, паста наносится по заранее сформированной программе на заданные точки ПП, заранее определен и объем пасты в каждой точке. Автоматический дозатор представляет собой рабочий стол, на который крепится обрабатываемая плата. Над рабочим полем автоматически перемещается дозатор, кото-

рый осуществляет нанесение материалов на плату. Для управления используется персональный компьютер и относительно несложное специальное ПО. Ключевые параметры автоматических дозаторов: скорость дозирования (до 15 тыс. точек в час) и максимальный формат обрабатываемой платы (до 450x450 мм).

Для нанесения материалов можно применять и ручное дозирование. Однако это рационально только при очень невысокой производительности монтажного участка, так как у оператора производительность существенно ниже, чем у любого оборудования.

На рынке имеется достаточно большой выбор автоматических и полуавтоматических дозаторов, которые позволяют наносить на платы не только паяльную пасту, но и адгезивы для крепления компонентов, размещаемых на нижней стороне ПП. Как и любой последовательный процесс, такой способ нанесения пасты занимает гораздо больше времени, чем трафаретная печать. Однако для дозатора не требуется разрабатывать и изготавливать трафарет. Стоимость трафарета составляет \$200–600 за штуку. При большом их количестве себестоимость обработки существенно увеличится, несмотря на то, что стоимость самого оборудования не слишком высока.

Если на производстве изготавливается большое число конструкций плат, то целесообразно применять метод дозирования, особенно при лабораторном производстве, когда на оборудование, ввиду его невысокой производительности, были потрачены сравнительно небольшие финансовые средства. В случае применения трафаретной печати необходимо использовать по одному трафарету на каждую сторону каждой разновидности платы, что потребует введения на производстве новой операции по изготовлению трафаретов или их покупки.

В случае промышленного производства, напротив, нанесение материалов методом дозирования нежелательно из-за низкой скорости и стабильности процесса по сравнению с трафаретной печатью. К тому же на крупносерийных производствах число выпускаемых конструкций плат ограничено, да и стоимость трафаретов не внесет заметного вклада в общие расходы ввиду высокой стоимости оборудования.

Устройства трафаретной печати могут быть как ручными, так и автоматическими.

Ручной принтер представляет собой сравнительно простое устройство: на металлической раме закрепляется трафарет, после чего раму крепят к рабочему столу, на котором находится плата. Для лучшего соприкосновения платы и трафарета в пространстве между ними может быть создано низкое давление. Для этого дополнительно используют вакуумный насос. При использовании ручного принтера давление на рапель осуществляется оператором вручную.

В автоматических принтерах все операции – совмещение трафарета и печатной платы, осуществление приводного давления на рапель, дозирование припойной пасты на трафарет – выполняются автоматически. Эти устройства могут работать как автономно, так и в составе производ-

ственной линии. В зависимости от класса этого оборудования оно может выполнять различные дополнительные функции, такие как автоматическая инспекция печатной платы при помощи технического зрения, приводное изменение ширины конвейера и другие. Основные параметры автоматических принтеров: максимальный формат платы, который может достигать значения 510x510 мм, и скорость перемещения ракеля (до 150 мм/с).

При использовании автоматического принтера в промышленной линии особое значение приобретают возможности программного обеспечения (ПО), которое на нем установлено. В наиболее высокочемодатном и дорогостоящем оборудовании ПО позволяет устройству получить доступ к централизованной базе данных предприятия, подключаться к локальной сети и даже использовать Интернет для удаленного доступа. Все это позволяет оборудованию повышать качество изделий и уменьшать количество ошибок.

8.2. ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРАФАРЕТОВ

Выбор (изготовление) трафарета – один из наиболее важных шагов в процессе сборки. Главная функция трафарета – облегчить размещение припойной пасты. Цель – нанести точное количество материала на точно определенное место на ПП.

Рекомендованные соотношения шага выводов компонентов, размеров контактных площадок (КП) и размеров отверстий трафаретов приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1.

Шаг компонентов, мм	Промышленный стандарт ширины КП, мм	Промышленный стандарт ширины отверстий трафарета, мм	Толщина трафарета, мкм
1,27	0,635	0,635	200
1,0	0,5	0,5	150
0,825	0,45	0,425	125
0,635	0,4	0,3	125
0,5	0,3	0,25	125
0,425	0,25	0,2	120
0,3	0,2	0,15	100

Уменьшение размеров отверстий трафарета по отношению к размерам КП выполняется равномерно со всех сторон и центрируется по КП. Для уменьшения площади стенок окна трафарета и прилипания паяльной пасты к стенкам рекомендуется делать скругленные углы окон в трафарете.

Оптимальное соотношение площади отпечатка паяльной пасты к площади стенок окна в трафарете должно быть $S_{\text{КП}}/S_{\text{БС}} > 0,80$, где $S_{\text{КП}}$ – площадь отпечатка паяльной пасты на плате, $S_{\text{БС}}$ – площадь боковых стенок окна в трафарете.

Наиболее распространены три технологии для производства трафарета – химическое травление, лазерное испарение и электроосаждение. Каждая из них имеет свои особенности.

Химически вытравленные трафареты наиболее распространены и эффективны (в том числе по ценовым параметрам). Создаются путем травления металлической фольги, покрытой маской из фоторезиста с двух сторон. Профиль отверстий при этом имеет характерный вид (рис. 8.1 а).

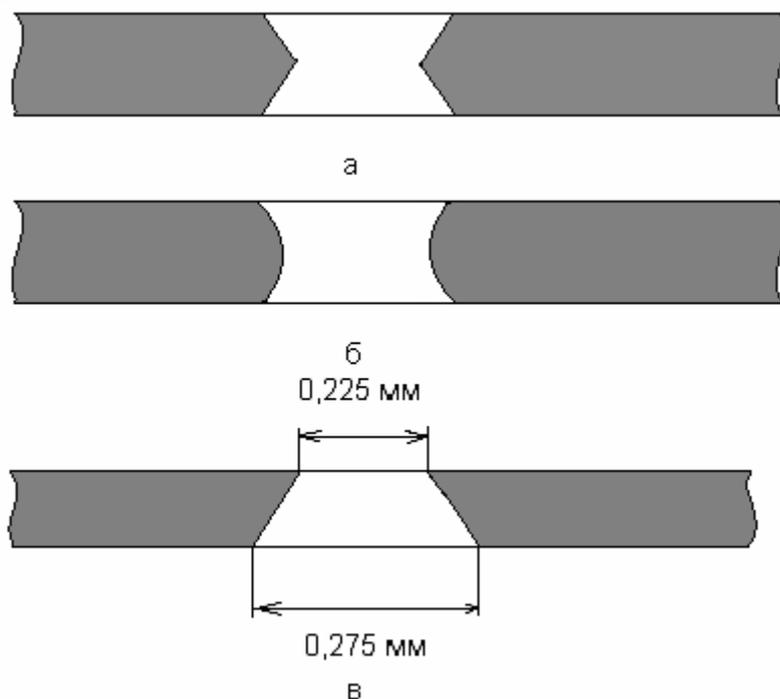


Рис. 8.1. Форма стенок отверстий трафаретов: а - при химическом травлении, б – после электрополирования, в – трапецеидальная форма отверстий.

При размере шага в 0,5 мм и менее такой профиль увеличивает сопротивление прохождению пасты, для его устранения применяют электрополирование стенок отверстий трафарета.

Электрополирование выполняется в кислотной ванне под воздействием постоянного тока. Такое травление вызывает эффект сглаживания неровной поверхности (рис. 8.1 б). Трафарет удаляется из ванны прежде, чем травление затрагивает верхние и нижние поверхности.

Электрополирование стенок отверстий трафарета значительно уменьшает поверхностное трение и позволяет хорошо продавливать пасту.

Трафареты с трапецеидальными отверстиями (рис. 8.1 в) имеют со стороны основания трафарета большие размеры, чем со стороны вершины на 20-50 мкм. Трапецеидальное отверстие может быть выполнено двумя способами: изменением размеров маски фоторезиста на разных сторонах фольги или изменением давления струи травителя при обработке разных сторон фольги. Такая форма отверстий подходит для шага компонентов 0,5 мм и выше.

Методом химического травления могут быть легко получены трафа-

реты двойного уровня, или «ступенчатые». Такие трафареты позволяют варьировать объем припоя для компонентов, имеющих различный шаг выводов. Ступенчатость должна быть на стороне ракеля, так как сторона основания трафарета должна ровно прилегать к плате (рис. 8.2).

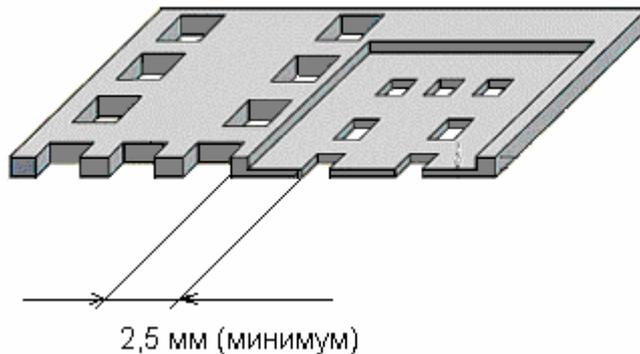


Рис. 8.2. Ступенчатый трафарет для компонентов с различным шагом.

Как и в технологии формирования рисунка ПП методом травления фольги (субтрактивная технология), при химическом травлении трафаретов возникает боковое подтравливание под маску фоторезиста, вызывающее относительное удлинение размеров отверстий. Это относительное удлинение зависит от толщины трафарета (фольги), поэтому размер отверстий определяется к толщине фольги как 1,5 к 1. То есть, при 150 мкм толщине трафарета минимальное отверстие будет 225 мкм.

Метод электроформирования трафарета основан на гальваническом наращивании металлической фольги (как правило, *Ni*) на основании (носителе), на котором сформированы «островки» фоторезистивной маски на месте будущих отверстий (рис. 8.3).

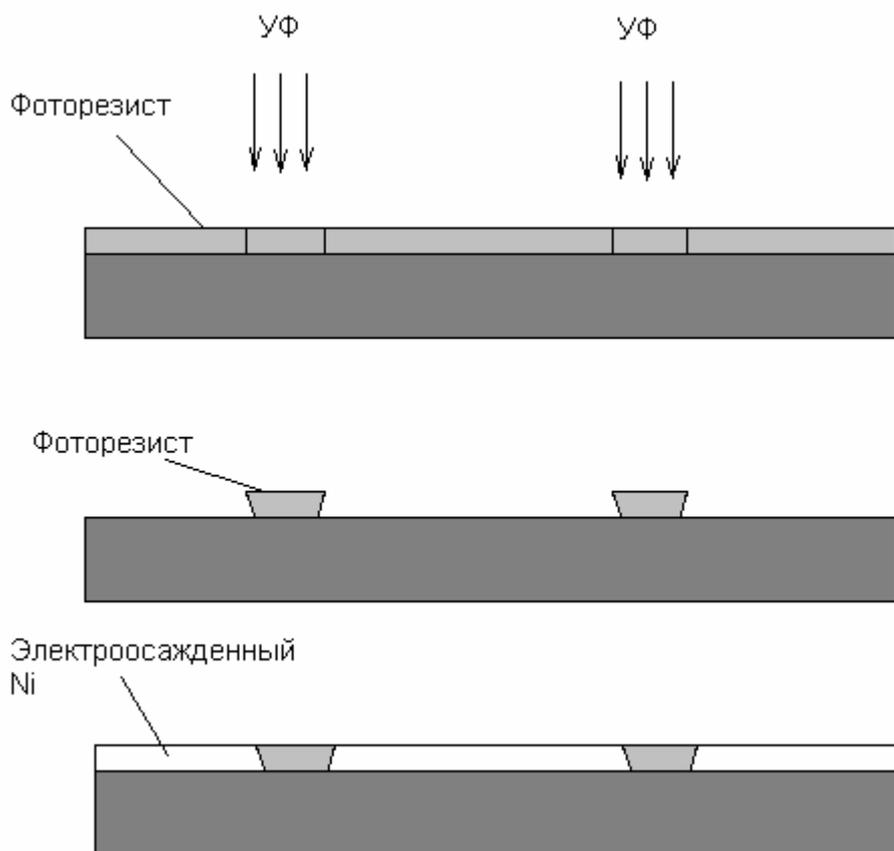


Рис. 8.3. Метод электроосаждения трафарета.

Трапецевидная форма отверстий трафарета облегчает отделение пасты при печати. Толщина трафарета может варьироваться от 25 мкм до 0,3 мм и подходит для нанесения пасты для ультрамалых шагов выводов компонентов: от 0,2 мм до 0,4 мм. Отношение размера отверстий к толщине трафарета 1 к 1.

На качество трафарета могут влиять неточности процесса фотолитографии и гальваники.

Трафареты, формируемые лазерным испарением, изготавливаются непосредственно по оригинальным данным клиента (Gerber формат) и не требуют фотолитографии. Данные Gerber файла, после необходимых модификаций, поступают на устройство управления лазерным лучом. Прямое формирование без промежуточных шагов позволяет повысить точность и воспроизводимость изготовления трафаретов.

По сравнению с химическим травлением края отверстий в ряде случаев могут иметь более неровные края в силу взрывного испарения металла. Однако главный недостаток процесса лазерного травления состоит в том, что машина вырезает каждое отверстие индивидуально. Естественно, чем больше количество отверстий, тем дольше процесс производства и более дорогостоящий трафарет.

Трафареты могут быть произведены комбинированным способом: химическим травлением для компонентов стандартного шага и лазерным испарением для компонентов малого шага. Этот «гибрид» обладает преимуществами обеих технологий: меньшей стоимостью и более быстрому

изготовлению. Готовый трафарет может быть электроотполирован, чтобы обеспечить гладкость стенок отверстий.

Лазерная методика – единственный процесс, который позволяет корректировать трафарет во время его изготовления (например, добавлять или изменять существующие отверстия или добавлять реперные знаки).

8.3. ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ТРАФАРЕТНОЙ ПЕЧАТИ

Для нанесения паяльной пасты могут использоваться ракель различной конструкции и материала, в том числе стальные или полиуретановые. Угол наклона ракеля: 60° - стандартный, 45° для компонентов с шагом $< 0,4$ мм.

Для контактных площадок прямоугольной формы имеет значение и направление движения ракеля: вдоль длинной или короткой стороны, поскольку из-за увлечения пасты ракелем вдоль одной из стенок трафарета остаются небольшие пустоты. Разный объем пасты на разных КП может приводить к разной высоте припойных столбиков после оплавления припойной пасты. Это может приводить к дефектам типа «открытое соединение» - отсутствию электрического контакта. Для предотвращения таких дефектов ракель движется под углом 45° к наиболее критичным посадочным местам компонентов (рис. 8.4).

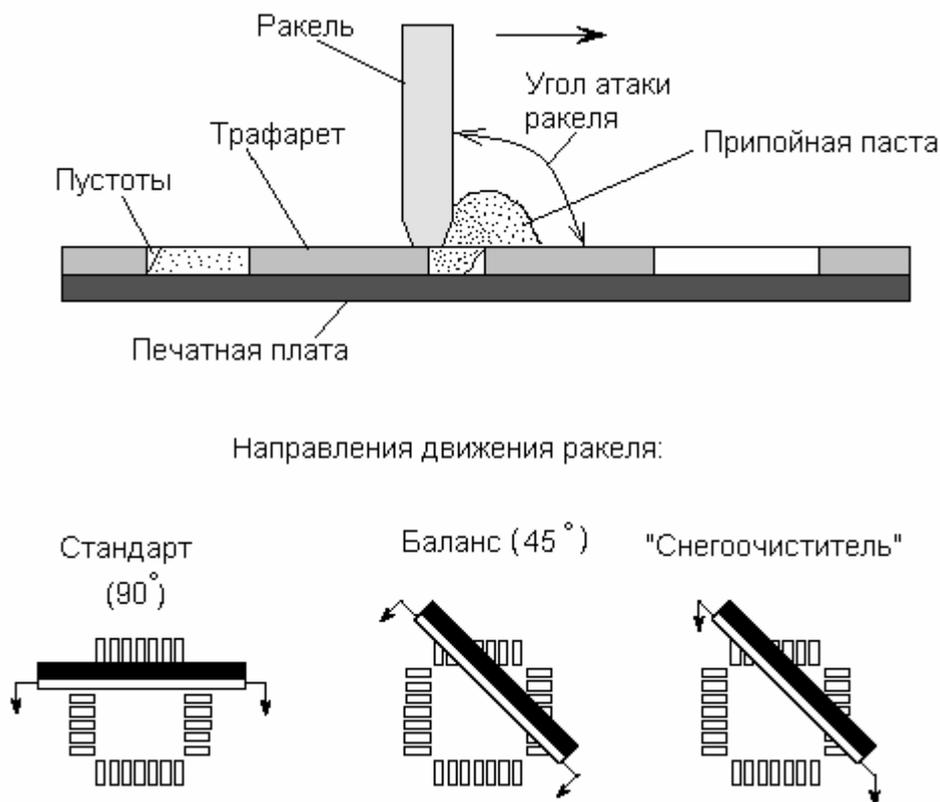


Рис. 8.4. Схема процесса нанесения припойной пасты на контактные площадки ПП с помощью трафарета и ракеля.

Давление ракеля подбирается опытным путем и зависит от толщины

трафарета и скорости перемещения ракеля. После прохода ракеля трафарет должен полностью очищаться от остатков паяльной пасты. Например, значения первоначальной установки давления металлического ракеля составляют от 0,12 кг (на каждый см длины ракеля) при скорости перемещения 50 мм/сек до 0,32 кг при скорости 150 мм/сек при температуре +23°C. Увеличение или уменьшение рабочей температуры на 1°C требует пропорционального изменения давления ракеля на 5%.

Скорость печати может составлять от 30 до 150 мм/сек.

Скорость разделения трафарета с печатной платой после нанесения паяльной пасты высокая – 20 мм/сек; для компонентов с малым шагом рекомендуется уменьшить скорость до 10 мм/сек.

После нанесения паяльной пасты на 15÷20 печатных плат рекомендуется произвести очистку трафарета с нижней стороны для предотвращения образования перемычек и шариков припоя в процессе пайки.

Для очистки трафарета разрешено использовать только специальные материалы (бумагу и промывочные жидкости). Обычные материалы хуже впитывают влагу и оставляют пыль, нитки и ворсинки, которые могут забивать окна в трафарете и создавать «мостики» между соседними контактными площадками, образуя перемычки припоя в процессе пайки.

8.4. ОЧИСТКА ПЛАТ ПОСЛЕ ПАЙКИ

Обычная ПП для ТПМК содержит много внутренних полостей (в том числе и под компонентами), имеющих выход на поверхность через узкие вертикальные зазоры между компонентами или их выводами. Если не принимать специальных мер, эти полости способны удерживать продукты разложения флюса и другие загрязнения, которые могут стать источниками коррозии или, в дальнейшем, причиной проникновения внутрь корпусов компонентов веществ, включающих полярные соединения, вызывающие повышенные токи утечки. Существенно и то, что усиленные попытки очистить плату, например, с помощью органических растворителей, сами по себе могут вызвать механические повреждения или коррозию.

Как правило, загрязнения бывают либо полярными (ионы каких-либо соединений), либо неполярными (не имеющими ярко выраженного ионного характера). Свободные ионы, особенно высоко электроотрицательные, такие, как ионы галоидов (хлоридов или фторидов), обладающие высокой химической активностью, быстро вступают в реакцию с металлом коммутационных дорожек, что вызывает процессы коррозии. Неполярные загрязнения, хотя и обладают меньшей активностью, тем не менее, ухудшают адгезию припоя, свойства конформного (защитного) покрытия и электрический контакт для функционального испытания микросборки.

Органические растворители в соответствии с их очистной способностью можно разделить на три группы.

Гидрофобные (не смешивающиеся с водой, используются для растворения органических загрязнений, например канифоли и жиров, и, в не-

значительной степени, полярных загрязнений).

Гидрофильные (смешивающиеся с водой, растворяют полярные и неполярные соединения, причем последние в меньшей степени, чем гидрофобные растворители).

Азеотропные растворители, представляющие собой в основном смесь вышеуказанных типов растворителей. В их состав обязательно входят такие ингредиенты, как фреон-113 или тетрахлордифторэтан, с добавками спиртов и стабилизирующих ингредиентов.

Очистка изделий с применением растворителей может быть реализована несколькими способами: погружением смонтированных плат в ванну с растворителем, равномерным по полю платы или направленным в виде струй опрыскиванием, либо комбинацией обоих методов. Может также применяться ультразвуковое перемешивание при очистке плат в ванне с растворителем.

На эффективность очистки может повлиять ряд факторов, в том числе расположение компонентов. Компоненты должны размещаться на поверхности платы таким образом, чтобы их корпуса не загоразивали друг друга при движении потока растворителя. Прерывания движения платы и остановки во время пайки волной припоя должны быть сведены к минимуму, чтобы флюс нигде не задерживался в полостях платы.

Если используются чувствительные компоненты, рекомендуется обрабатывать микросборки в потоке растворителя. При этом необходимо обеспечить максимальную однородность потока растворителя, а интервал времени между пайкой и очисткой уменьшить до минимума.

9. УСТАНОВКА КОМПОНЕНТОВ НА ПП

Установка компонентов является, пожалуй, наиболее важной и сложной операцией в технологическом цикле. Как правило, именно производительность установки компонентов на плату определяет общую производительность монтажного участка.

Наиболее простой и наименее производительный метод установки компонентов – ручной, при помощи соответствующего инструмента. В этом случае большую роль играют субъективные факторы, такие как уровень профессионализма и опыт оператора. Кроме того, при использовании некоторых современных компонентов вероятность ошибки оператора увеличивается. Установка наиболее сложных и мелких компонентов отнимает у оператора много времени, а для установки компонентов в корпусах BGA необходимо специальное оборудование.

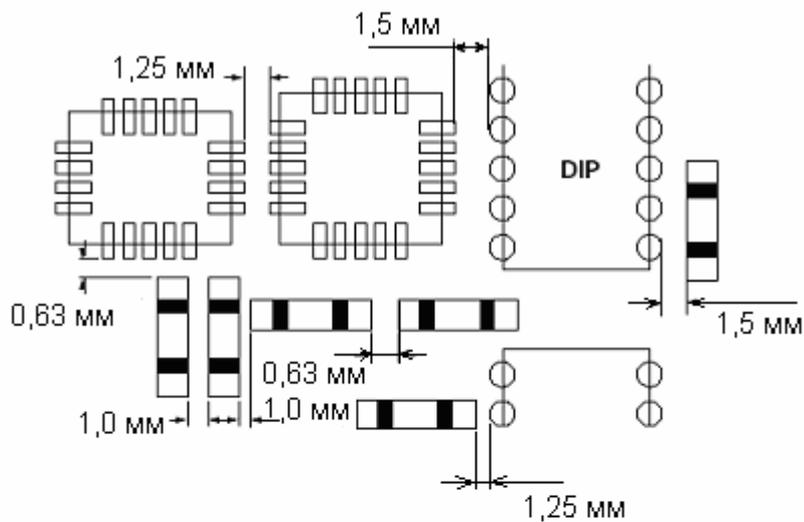
Повышение плотности монтажа на ПП – одно из основных достоинств технологии поверхностного монтажа (рис. 9.1). Уменьшение шага компонентов, а, следовательно, и размеров контактных площадок приводит к повышению требуемой точности установки компонента на плату. Если для DIP компонента с шагом 2,5 мм достаточна точность $\pm 0,25$ мм, то для шага 0,63 мм она возрастает до $\pm 0,05$ мм, а для шага 0,5 и менее ± 25 мкм. Безусловно, выдерживать и сохранять такую точность в течение

рабочей смены оператору крайне сложно, поэтому для поверхностного монтажа более характерна полуавтоматическая или автоматическая сборка.

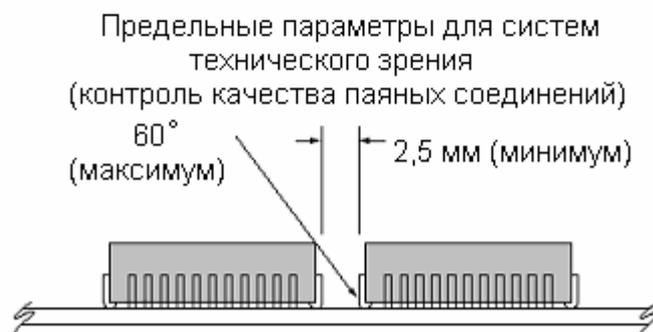
Из практики сложились следующие требования по точности позиционирования компонентов: на контактную площадку (КП) должно приходиться не менее 60% ширины вывода и выступ за пределы КП не должен превышать 25 мкм.

Из большого набора требований размеры КП и расстояния между компонентами наиболее важны с точки зрения технологичности.

Плотность компоновки определяет в том числе и ценовые критерии установки компонентов, пайки, очистки, проверки и ремонтпригодности.



а



б

Рис. 9.1. Минимально допустимые зазоры между компонентами на плате для автоматических укладчиков (а) и предельные зазор и угол зрения для систем оптического контроля качества пайки (б).

Самыми простыми и недорогими устройствами для установки поверхностно монтируемых компонентов являются ручные манипуляторы (полуавтоматический монтаж), которые обычно состоят из следующих узлов:

- 1) Базовое устройство с пантографом.

- 2) Головка с автоматическим вакуумным захватом.
- 3) Встроенная вакуумная помпа или внешний компрессор.
- 4) Набор вакуумных наконечников.
- 5) Карусельный питатель для подачи компонентов из россыпи.

Спектр оборудования, предлагаемого различными фирмами, достаточно широк, но в целом устройство таких установок одинаково. Установка состоит из рабочего поля, на котором закрепляется плата, над ней в полуавтоматическом режиме перемещается вакуумная присоска, предназначенная для захвата и перемещения компонента из накопителя на его место на плате. Такое оборудование комплектуется набором различных накопителей для компонентов (ленты, пеналы или поддоны). Последовательность установки и расположения компонентов на плате описаны в ПО, поставляемом в комплекте технической документации.

На производительность такого рода оборудования сильно влияет квалификация и опыт оператора. Как правило, полуавтоматы по установке компонентов позволяют монтировать до 400÷500 компонентов в час.

Наиболее сложным, дорогим и высокопроизводительным оборудованием, используемым на данном этапе технологического цикла, являются автоматические установщики. Принцип их работы состоит в следующем: с помощью ПО файлы САПР транслируются в исполнительные программы, посредством которых монтажная головка устройства автоматически перемещает компонент из накопителя на место его монтажа на плате.

Производительность автоматических установщиков компонентов может достигать до 100 тыс. компонентов в час (для самых простых типов корпусов).

Номенклатура устанавливаемых компонентов у такого оборудования весьма широка: от ограниченного числа чипов и микросхем, наиболее простых для установки, до самых сложных компонентов, таких как чипы 0402 и 0201, ИМ с шагом выводов менее 0,6 мм и корпусов с шариковыми выводами (BGA). Наиболее дорогостоящее оборудование позволяет монтировать не только SMD, но и некоторые выводные компоненты.

Максимальная величина формата монтируемой платы может достигать значения 457x508 мм.

Формат головок для захвата и установки компонентов диктуют ограничения на максимальную плотность монтажа платы (см. рис. 9.1). Ограничения на размещение компонентов (максимальный угол зрения и зазор между соседними корпусами, высота рядом расположенных корпусов) налагают также установки оптического контроля качества нанесения паяльной пасты и пайки.

В некотором наиболее сложном оборудовании предусмотрена возможность использования производственной мощности установщика для выполнения дозирования материалов. Для этого вместо головки, устанавливающей компоненты, в автомате используется специальная дозирующая головка.

Как и для любого автоматического оборудования, в автоматах-

установщиках большое значение имеет используемое ПО. Оно имеет следующие возможности:

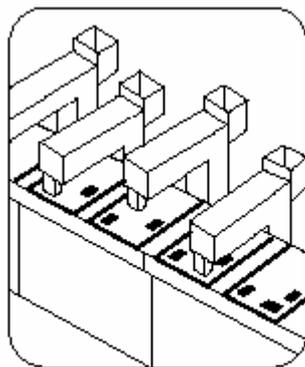
- возможность оптимизации исполнительной программы установки компонентов с точки зрения наиболее короткого перемещения головки;
- моделирование работы оборудования, позволяющее вычислять время сборки продукта без реального запуска автомата;
- сбор статистической информации о важнейших параметрах работы оборудования;
- возможность отбраковки помеченных бракованных плат;
- защита от несанкционированного или неквалифицированного доступа при помощи пароля.

Выбор оборудования, которое будет использоваться на данном этапе, необходимо проводить исходя из особенностей конструкции платы и производительности участка. При лабораторном производстве оптимально использование полуавтоматов, которые просты в управлении, сравнительно недороги (примерно 15÷18 тыс. долл.), снижают утомляемость оператора, значительно превышают производительность оператора. При больших объемах производства необходимо использование автоматов, которые помимо увеличения производительности повышают качество изделия и снижают вероятность ошибок.

9.1. СПОСОБЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

В технологии поверхностного монтажа компонентов различают четыре способа позиционирования компонентов:

- *Конвейерное позиционирование («поточно-последовательное позиционирование»)*. Плата движется по конвейеру вдоль нескольких модулей позиционирования. Каждый модуль осуществляет размещение одного типа корпусов (рис. 9.2).

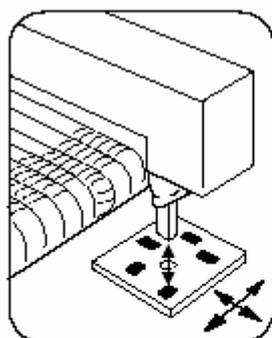


- Подвижная плата/ фиксированные головки
- Каждая головка устанавливает один компонент
- от 1,8 до 4,5 секунд на плату

Рис. 9.2. Конвейерное позиционирование.

- *Последовательное единичное либо групповое позиционирование.* Одна или две управляемые от ЭВМ монтажные головки выбирают компоненты из питателей и устанавливают их на плате. В некоторых автоматах подвижная головка перемещается в двух направлениях (X и Y), в то вре-

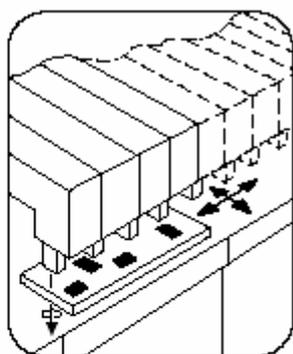
мя как в других автоматах под неподвижную головку подводится подвижный стол для позиционирования компонентов. Этот способ позиционирования в настоящее время используется наиболее часто (рис. 9.3).



- Плата и головки перемещаются в плоскости X-Y
- Компоненты устанавливаются на плату последовательно
- От 0,3-0,8 до 4,5 секунд на компонент

Рис. 9.3. Последовательное позиционирование.

• *Последовательно-параллельное позиционирование (Последовательно-параллельное позиционирование называют еще синхронно-последовательным, поскольку оно осуществляется в несколько приемов, причем за один прием устанавливается сразу несколько компонентов в корпусах различной сложности).* В этом случае автоматы имеют координатный столик, на котором крепится плата и последовательно расположенные монтажные многозахватные головки. Столик вместе с платой может перемещаться по осям X-Y по заранее составленной программе. Каждая головка устанавливает свой тип компонента либо последовательно, либо одновременно (рис. 9.4).

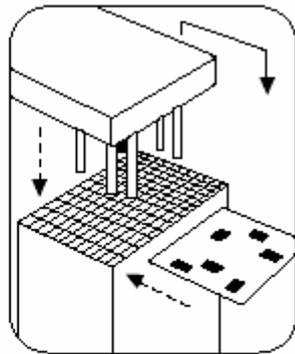


- Фиксированные головки/плата перемещается в плоскости X-Y
- Головки выдают компоненты последовательно-параллельно
- 0,2 секунды на компонент

Рис. 9.4. Последовательно-параллельное позиционирование.

• *Массовое или поточно-параллельное позиционирование:* многоза-

хватные головки за один прием устанавливают на плату большой набор компонентов. За одну операцию ими заселяется часть или вся плата (рис. 9.5).



- Плата и головки фиксированы
- Все компоненты устанавливаются одновременно
- От 7 до 10 секунд на плату

Рис. 9.5. Поточно-параллельное позиционирование.

Метод массового размещения более всего применим к очень высоким объемам выпускаемой продукции с низкой степенью смешанности компонентов для различных типов монтажа. Автоматы-укладчики, использующие метод последовательного группового размещения, могут обеспечить высокий уровень гибкости производства, но с более низкой скоростью позиционирования. Они применяются в случае низкого или среднего объема производства изделий с высокой степенью смешанности монтажа. Последовательно-параллельные автоматы наилучшим образом приспособлены для средних и высоких объемов работ при низкой степени смешанности монтажа.

В некоторых автоматах предусмотрена возможность смены монтажных головок и захватов. Это увеличивает гибкость производственных линий, хотя и снижает производительность.

9.2. СИСТЕМЫ ПОДАЧИ КОМПОНЕНТОВ

При разработке автоматов-укладчиков используют принцип произвольного доступа, заключающийся в том, что компонент выбирается из питателя непосредственно перед позиционированием. Поэтому функциональные возможности автоматов не связаны с ограничениями последовательности выбора компонентов во времени.

Существует несколько способов подачи компонента в монтажную головку:

- Компонент переносится из питателя на место установки с помощью поворотной башенной головки.
- Монтажная головка сама выполняет операцию транспортировки компонента из питателя. Она захватывает компонент непосредственно из питателя и размещает его на плате.
- Питатели устанавливаются на каретку, управляемую ЭВМ, которая

в нужный момент подает на сборку требуемый компонент.

От метода подачи компонентов зависит конструкция питающих механизмов. Применение поворотных башенных головок и подвижных кареток ограничено конструкцией и типоразмерами корпусов, поставляемых на лентах-носителях. Именно питатели этого типа позволяют производить высокоскоростную сборку. Автоматы, рассчитанные на совместную работу с такими системами питания, как ленты-носители компонентов, магазины-шины и ячеистые магазины, производят захват каждого компонента отдельно и поэтому имеют низкую производительность, вместе с тем они обладают большой гибкостью применительно к разным типам конструкций компонентов.

9.3. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

Производительность автоматов-укладчиков компонентов в ТПМК колеблется в диапазоне примерно от 500 до более чем 100000 компонентов в час. Несомненно, такие автоматы сильно отличаются друг от друга по своей гибкости, методам позиционирования и уровню конструктивной сложности. По своей производительности автоматы-укладчики компонентов в ТПМК подразделяются на четыре группы, каждая из которых соответствует конкретным условиям применения:

- Автоматы с малой производительностью: менее 4000 компонентов в час. Предназначены для выпуска небольших партий изделий в научно-исследовательских лабораториях или опытных партий на этапе освоения техники поверхностного монтажа. Их конструкция разрабатывается с учетом удобства работы в период обучения специалистов. Сюда также входят высокопрецизионные автоматы для позиционирования PLCC.

- Автоматы со средней производительностью: 4000-6000 компонентов в час. Большая часть этих машин обладает способностью к гибкой перенастройке.

- Высокопроизводительные автоматы: 9000-20000 компонентов в час. Предназначены для позиционирования чип-компонентов в прямоугольном корпусе или в корпусе типа MELF, а также компонентов в корпусе типа SO. Перспективные автоматы могут также устанавливать корпуса SO и PLCC с J-образными выводами (поставляемые на ленте шириной 16, 24, 32 и 44 мм).

- Автоматы для массового производства: более 100000 компонентов в час. Они могут устанавливать только простые чип-компоненты.

Приведенные значения производительности автоматов-укладчиков заимствованы из проспектов их изготовителей. Следует учитывать, что обычно в проспектах указывают максимальную производительность в конкретных условиях применения оборудования с учетом минимального хода головки, небольшой зоны позиционирования и расположения питателей вблизи монтажной головки.

Вследствие недостаточной стандартизации корпусов компонентов и типов их упаковки способность оборудования к гибкой перенастройке яв-

ляется ключевым критерием выбора автомата-укладчика.

Производительность и уровень гибкости автомата-укладчика обуславливают потенциальные возможности его применения. Гибкость укладчика в основном определяется количеством типоразмеров корпусов компонентов и конструкций питателей, с которыми он в состоянии работать. Повышение гибкости не обязательно означает снижение производительности. Так, например, новейшие высокоскоростные автоматы японского производства (производительностью более 12000 компонентов в час) могут позиционировать все компоненты, поставляемые на лента-носителях шириной 8, 12, 16 и 24 мм. Малопроизводительные укладчики, обладающие высокой гибкостью, могут работать со всеми форматами упаковки поставляемых компонентов (лента-носитель, магазин-шина, ячеистый магазин). Гибкость оборудования в этом случае связана со следующими факторами:

- Ограниченным количеством входов загружаемых компонентов различных типоразмеров, обычно менее 60 (увеличение числа типоразмеров корпусов компонентов, с которыми может работать технологическая линия, требует совместного использования нескольких сборочных модулей).
- Высокоточным позиционированием с использованием системы технического зрения, рекомендуемой для установки компонентов с малым шагом выводов (менее 0,635мм).

9.4. ПЕРСПЕКТИВЫ СБОРОЧНО-МОНТАЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

Значительное влияние на автоматизированное оборудование для производства электронных компонентов и автоматизированные производственные системы сборки ПП исходит от потребителей сборочного оборудования, которые в качестве одного из главных требований выдвигают возможность адаптации всей этой инфраструктуры к своему сборочно-монтажному комплексу.

Сборочные линии имеют дело с большим количеством различных видов компонентов, процессов и технологических применений. *Перспективной концепцией для монтажных автоматов в ближайшем будущем станет концепция, где всего лишь одна единица оборудования решает как можно более широкий круг задач.*

В свою очередь, заказчики сборочного оборудования становятся все более практичными, и в скором времени приобретение отдельного станка для каждой отдельной задачи будет считаться неэкономичным.

Как одна из основ развития универсальности и гибкости сборочных систем все большее значение приобретает программное обеспечение оборудования.

Должен повышаться коэффициент использования оборудования.

Возрастают требования к качественным показателям сборки плат (в

первую очередь к реальным коэффициентам дефектов сборки), и в первую очередь это повышает требования к производителям оборудования.

Ожидается сокращение удельной стоимости монтажа компонента, как простого, так и сложного.

Ожидается увеличение производительности в пересчете на 1 м² площади помещения.

В целом, многие из этих тенденций применимы не только к сборочно-монтажному оборудованию в технологии монтажа на поверхность, но и в технологии выводных и нестандартных компонентов, а также сборки плат со смешанным монтажом.

Главным направлением при производстве электронных модулей остается снижение себестоимости сборки при поддержании стабильно высокого уровня качества.

Ужесточаются требования к большей контролируемости и предсказуемости сборочно-монтажных процессов. К примеру, показатели точности монтажа SMD-компонентов предоставляются ведущими производителями с привязкой к уровню распределения погрешности не хуже 5 сигма. Практически ушел в прошлое стандарт 3 сигма – сейчас им пользуются только для спецификации оборудования, рассчитанного на работу с самыми простыми компонентами.

Достаточно обязательным стало и предоставление данных по окончательному коэффициенту дефектов сборки, вызванных самим оборудованием. Этот коэффициент также зависит от сложности обрабатываемых компонентов, но для критически сложных ИМ не должен быть хуже 50 дефектов на миллион корпусов, или, в более привычном процентном выражении, 99,995 % годных.

Также становится весьма распространенной функция автоматического восстановления техпроцесса после той или иной ошибки платы, компонента или оператора, что снижает время простоя линии между двумя ближайшими моментами вмешательства оператора.

Процедуры замены тары с использованным компонентом, перехода от изделия к изделию, оптимизация сборочной линии и даже обучение операторов исследуются с точки зрения применения различных форм автоматизации на основе программного обеспечения, а также в сторону их упрощения. Это приводит к повышению относительного времени использования оборудования.

В целом, автоматические системы для сборки электронных модулей будут в гораздо большей степени полагаться на программное обеспечение. Это будет компьютеризированная техника, управляемая мощными контроллерами, способными обработать большой объем информации в реальном времени, с широким спектром функций точной механики. Безусловно, как механические, так и программные функции оборудования станут более сложными, но задача состоит в том, чтобы обеспечить даже более простое, чем сегодня, управление как отдельной машиной, так и комплексной линией на уровне оператора.

10. ОПЕРАЦИОННЫЙ И ДРУГИЕ ВИДЫ КОНТРОЛЯ В СБОРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Полноценное производство включает в себя следующие этапы:

- входной контроль плат, компонентов, материалов;
- подготовка компонентов, материалов;
- нанесение адгезива(клея)/паяльной пасты, контроль качества нанесения материалов;
- установка компонентов, контроль качества установки;
- отверждение клея, контроль дефектов установки;
- оплавление припоя с помощью печей или в машинах пайки волной, контроль качества пайки и дефектов расположения компонентов;
- отмывка;
- выходной контроль;
- ремонт;
- влагозащита;
- упаковка.

Кроме этого, оборудование сертифицированного производственного участка, соответствующего современным стандартам (серии ISO 9000), подразумевает целый ряд мероприятий по оборудованию производственных помещений системой антистатика, вентиляции, дымоулавливания и т. д.

Как видно из этапов сборочного процесса, в нем большое место занимают операции контроля: входной контроль, операционный контроль, выходной контроль. По степени охвата большинство операций относятся к сплошному контролю, т.е. проверке подвергаются все модули. *Все обнаруженные дефекты фиксируются исполнителями операций в сопроводительной документации на узел для последующего устранения, для статистического учета и с целью выявления и устранения причин их появления.* Протоколирование дефектов в соответствии с программой ведет и автоматическое оборудование.

Визуальный контроль с помощью оператора – самый распространенный способ. Оборудование – микроскоп с увеличением от 2 до 10 крат. Контроль производится только после операции оплавления припоя, иначе можно сместить компоненты или смазать пасту. Качество контроля зависит от квалификации оператора и степени его усталости. Такой контроль применяется в лабораторных условиях или на опытном производстве.

В сборочных линиях контроль осуществляют автоматические установки. Рассмотрим основные типы такого оборудования.

Автоматическая оптическая инспекция (АОИ). Автоматизированный контроль реализуется в ходе четырех основных этапов технологического процесса: нанесения припойной пасты, позиционирования компонентов, отверждения адгезива и проверки после пайки. Очень важна оптимизация процесса трафаретной печати припойной пасты, поскольку трафаретная печать служит источником дефектов пайки (перемычек и

непропаев), а дефекты, связанные с пайкой, являются основной причиной отбраковки изделий на выходном контроле.

Настоятельно рекомендуется контроль собранных плат после отверждения адгезива, поскольку нанесение адгезива не всегда производится столь качественно, как намечается. Вследствие недостаточного или чрезмерного количества нанесенного адгезива компоненты могут оказаться приподнятыми (под углом по отношению к поверхности платы) или установленными с разворотом (смещенными в плоскости платы). Это способствует появлению дефектов при пайке. Отсутствие конвейера для транспортировки коммутационных плат и перемещение плат вручную (после позиционирования компонентов) в камеру для отверждения адгезива может привести к смещению компонентов.

АОИ позволяет контролировать:

- нанесение припойной пасты (недостаточное, избыточное, неточное, позиционирование трафарета);

- качество позиционирования компонентов (отсутствие/наличие компонента, точность позиционирования, включая разворот по горизонтали и вертикали, несоответствие полярности или номера вывода, дефект вывода, наличие посторонних предметов);

- качество паяного соединения (короткое замыкание, непропай, несмачиваемость, излишек или недостаток припоя).

Основой АОИ является формирование изображений объектов и анализ характерных особенностей их элементов. Двухмерное изображение объекта формируется оптическими матрицами на основе приборов с рядовой связью (ПЗС). Для повышения контрастности изображения используют дополнительное освещение инспектируемой поверхности. В зависимости от сложности и стоимости установки применяется несколько ПЗС камер и источников освещения. Типичными параметрами установки являются: стандартное поле зрения (порядка 30x50 мм) и поле высокочеткого зрения (порядка 6x8 мм), скорость сканирования (до 18÷36 см²/сек) и количество одновременно обрабатываемых изображений (как правило, более 70).

Используются монохромные системы (наиболее простые), двух- и трехцветовые (самые распространенные на сегодняшний день). Фон теплового излучения от платы и компонентов может создавать помехи, которые влияют на качество получаемого изображения. Компенсация помех от теплового фона может быть компенсирована программными средствами. Изображение оцифровывается в каждой точке в зависимости от амплитуды (от 0 до 255 по серой шкале или для одного из цветов – красный, зеленый, синий), формируется матрица, несущая информацию об объекте. Сформированная картинка может сравниваться с эталонным изображением платы на наличие дефектов или с информацией о сборке на основании данных CAD и Gerber-файлов. Такие системы весьма быстрые, позволяют выполнять 100%-ный контроль плат со скоростью до 150 000 компонентов в час, но зависят от степени освещенности объекта и чувствительны к смене материала платы и компонентов.

Большинство АОИ весьма прилично обнаруживают дефекты расположения компонентов и с меньшим успехом различают дефекты нанесения припойной пасты на КП или качество пайки.

Оптические системы на основе лазеров могут формировать 3-мерное изображение объектов. Они применяются также и для двумерного анализа сборок, особенно в тех случаях, когда наблюдаемые элементы имеют малую высоту или небольшое различие по контрасту (отверстия, реперные точки). В отличие от оптических ПЗС систем, лазерные системы в составе автоматических сборщиков не формируют изображение объекта, а скорее анализируют отражение от компонента. И если присутствует тень вместо отраженного луча, то компонент пропущен при установке и система выдает соответствующее сообщение.

Рентгеновские контрольные технологические установки (РКТУ). Для контроля качества внутренних слоев ПП и качества пайки некоторых типов компонентов оптические методы неприменимы. В этих целях применяется анализ изображений, полученных с помощью рентгеновских установок. Изображение внутренних слоев МПП и паяных соединений шариковых выводов корпусов типа BGA, скрытых под днищем микросхемы, может быть получено благодаря высокой проникающей способности рентгеновских лучей и разной способности материалов поглощать γ -кванты. Проникающая способность излучения зависит от его энергии, которая определяется напряжением на аноде рентгеновской трубки. Для пластика ПП достаточно напряжения в 30 кВ, для исследования паяных контактов BGA компонента требуется напряжение 100 кВ. Стандартным является напряжение в 160 кВ на аноде рентгеновских технологических установок. Особой опасности для персонала такое излучение не представляет, поскольку оно не является жестким и полностью поглощается достаточно тонкими металлическими защитными стенками.

Рентгеновские лучи позволяют получать изображения с гораздо большим разрешением, чем в оптическом диапазоне, по крайней мере, от 0,5 до единиц микрон. Существуют определенные сложности формирования увеличенного изображения объекта в рентгеновских лучах, поскольку из-за высокой проникающей способности в рентгеновском диапазоне не существует линз или других элементов, привычных для обычной оптики. Поэтому основная задача лежит на различных алгоритмах обработки изображения, конвертированного фотоприемником γ -квантов в обычный электрический сигнал. Такие системы позволяют получать увеличение объектов в 200÷1000 раз.

Достаточно хорошо с помощью РКТУ идентифицируются дефекты пайки, скрытые под корпусами микросхем: непропаи и короткие замыкания BGA, CSP, Flip Chip, J-выводов, безвыводных кристаллоносителей. Только с помощью рентгеновского контроля можно обнаружить дефекты типа пустот внутри паяных соединений. Весьма широкое применение рентгеновский контроль нашел в производстве МПП для обнаружения дефектов ширины внутренних проводящих дорожек, расслоения диэлектрика и других.

Однако такие установки весьма дороги, для них характерна низкая скорость контроля, повышенные эксплуатационные расходы и не очень высокая эффективность контроля.

Электрический контроль. Каждому производителю ПП приходится решать проблему контроля качества выпускаемой продукции. Эта проблема значима и для потребителя ПП, поэтому в технологической цепочке предусмотрен входной контроль компонентов и ПП. При производстве ПП применяются все основные методы тестирования: оптический, рентгеновский, электрический и рефлектометрический (для высокочастотных устройств).

При тестировании электрическим методом платы устанавливаются на адаптеры, построенные по принципу «поля контактов». Для обнаружения коротких замыканий и обрывов используется низкое напряжение (10 В). Высоким напряжением (500 В) тестируется изоляция на утечку и пробой. Наличие тестовых контактов в переходных отверстиях, расположенных на одной дорожке ПП, позволяет с высокой точностью локализовать обрывы. Тестирование даже самой сложной платы при помощи этого метода занимает несколько секунд. Самой ответственной частью тестеров, использующих принцип «поля контактов», является непосредственно тестовый контакт, так как именно от качества контактирования зависит достоверность конечной информации. Тестовые контакты состоят из подпружиненной контактирующей части и гильзы. Контактующая часть необходима для качественного контакта с ПП. Для соединения с переходными отверстиями, выводами штырьковых компонентов, тестовыми площадками предусмотрены различные формы контактирующих соединений - коронка, игла, воронка и др. Гильзы предназначены для проводного соединения с измерительной частью системы и отличаются по способу соединения с проводом (накрутка, обжим, пайка).

Слабое место в тестерах такого типа - адаптерная часть. Самая дешевая конструкция адаптера – та, в которой провода идут непосредственно от гильз контактов к измерительной части. В этом случае процесс тестирования слишком длительный и трудоемкий. Проще, но и дороже, если база адаптерной части имеет разъем, через который к измерительному модулю подключается сменная часть. Такая конструкция пользуется наибольшим спросом у производителей узлов РЭА, так как для современного производства характерна малая серийность при широкой номенклатуре выпускаемых изделий. Необходимое условие тестирования в серийном и крупносерийном производстве – быстрый переход от одного изделия к другому. Учитывая, что номенклатура изделий на больших предприятиях велика, стоимость всех адаптеров может оказаться выше стоимости самой системы.

Лучшее решение для производства с большой номенклатурой – применение оборудования, работающего по методу «летающих пробников». Суть его в том, что тестеры имеют несколько головок с приводами по осям X, Y, Z, на каждой из которых установлен пробник. Головки поочередно контактируют с платой, при этом происходит подача и измере-

ние сигнала. При таком тестировании не требуется дополнительных адаптеров. Для перехода от одной платы к другой достаточно изменить программу тестирования. Программы перемещения пробников методом трансляции из систем САД значительно сокращают время подготовки тестовой обработки и перехода от одной платы к другой. Вместе с тем метод «летающих пробников» не обеспечивает высокой производительности тестирования, хотя цена на это оборудование достаточно высока.

При **тестировании многослойных ПП** возникают определенные сложности. Обычные способы («поле контактов», «летающие пробники») позволяют найти цепи с имеющимися короткозамкнутыми слоями или проводниками, однако они не определяют их точного местоположения. Если учесть, что стоимость некоторых МПП достаточно велика, то можно говорить о рентабельности оборудования, позволяющего локализовать и устранить такие дефекты. Для точного определения места межслоевого короткого замыкания применяется оборудование, работающее по методу «векторного поиска». Суть его в том, что на область предполагаемого дефекта подается напряжение питания, после чего отслеживается зависимость изменения величины протекающего тока от положения пробника на ПП. В основе приборов с такой технологией применяются очень точные миллиомметр, микровольтметр и миллиамперметр.

Еще одна особенность оборудования учитывается при тестировании ПП, предназначенных для высокочастотной техники, или плат с контролируемым импедансом. Дорожку в такой плате уже нельзя рассматривать как простой проводник. В таком проводнике наряду с обычным сопротивлением необходимо контролировать и волновое (импеданс). Волновое сопротивление измеряется рефлектометрическим методом. Происходит наблюдение за формой волнового сопротивления линии передачи по всей ее длине, и при этом измеряется коэффициент отражения импульсов с малым временем нарастания. Проблема в том, что стандартные рефлектометрические приборы представляют собой сложное измерительное оборудование и применяются, как правило, в лабораторных условиях.

Методы тестирования сборок. Методы тестирования радиоэлектронных изделий на стадии производства подразделяются на два класса – *внутрисхемное и функциональное*. Каждый из методов отличается способом контактирования с тестируемым изделием.

При **внутрисхемном тестировании** проверяются отдельные компоненты на плате или фрагменты схем. Применяются методы исключения влияния параллельных цепей. При проверке резистора, например, измеряется именно его сопротивление, а не сопротивление цепи, к которой он подключен. Внутрисхемное тестирование подразделяется в свою очередь на аналоговое и цифровое.

При аналоговом внутрисхемном тестировании обычно проверяется:

- наличие коротких замыканий и обрывов;
- номиналы дискретных компонентов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей, дискретных полупроводниковых приборов);

- наличие и правильность установки микросхем.

Влияние параллельных цепей исключается установкой блокирующих напряжений. Применение метода многопроводного измерения, точный подбор напряжения и частоты тестирования также препятствуют влиянию параллельных цепей. Этот метод тестирования позволяет обнаружить до 80% дефектов сборки, поэтому аналоговое внутрисхемное тестирование часто называют анализом производственных дефектов.

При цифровом внутрисхемном тестировании цифровые микросхемы проверяются на соответствие таблице истинности. Для исключения влияния параллельно установленных микросхем (например, при использовании шинной технологии) на вход тестируемой микросхемы подаются импульсы большого уровня с ограниченной длительностью. Такой метод называется backdriving.

Выбор оборудования и метод контактирования для внутрисхемного тестирования зависит от требований и возможностей пользователя.

Метод клипс и пробников универсален и недорог. Вместе с тем он требует больших временных затрат и предполагает высокий уровень подготовки персонала. Обычно его применяют при единичном производстве и при ремонте.

Метод «поле контактов» предполагает изготовление тестового адаптера для каждого изделия. Контактное соединение происходит через переходные отверстия в плате, выводы штырьковых компонентов или специально подготовленные тестовые площадки. Такой метод обеспечивает высокую производительность. Используется в среднем и крупносерийном производстве.

При **функциональном тестировании** осуществляется проверка работоспособности модуля и, при необходимости, его регулировка и настройка. Тестовое оборудование, применяемое при функциональном тестировании, выполняет:

- подачу питающего напряжения с возможностью изменения его в автоматическом режиме, от минимального до максимально допустимого;
- подачу цифровых и аналоговых входных сигналов в широком диапазоне частот и напряжений;
- измерение параметров выходных сигналов;
- эмуляцию нагрузок;
- обмен данными с тестируемым устройством;
- обработку результатов измерений и вывод их на дисплей и принтер в удобном для пользователя виде;
- накопление и обработку статистической информации.

При функциональном тестировании контакт с изделием осуществляется обычно через крайовой разъем.

Технологии современного производства постоянно совершенствуются, и в условиях жесткой конкуренции все острее ощущается проблема качества. С помощью одного лишь технологического оборудования решить ее невозможно. Уже сейчас многие отечественные предприятия вводят в производственный процесс системы обеспечения качества,

важной частью которых являются системы автоматического тестирования. Они позволяют не только определять производственные дефекты, но и вести статистический учет неисправностей для своевременной корректировки процесса производства, и, следовательно, для повышения качества электронного изделия.

11. РЕМОНТ УЗЛОВ С ПОВЕРХНОСТНЫМ МОНТАЖОМ

Большое количество контрольных операций в сборочном производстве направлено на как можно раннее обнаружение возможных дефектов, поскольку чем позднее он проявляется, тем дороже он обходится производителю. Многие ошибки установки компонентов на плату автоматическое сборочное оборудование может устранять самостоятельно в соответствии с ПО. При дефектах нанесения припойной пасты плата очищается и поступает на повторную операцию трафаретной печати.

Операция ремонта узлов выполняется вручную, включается в процесс сборки после стадии пайки узла и соответствующей операции контроля. Ремонт узла заключается, как правило, в замене дефектного компонента или корректировки дефектного паяного соединения в соответствии с рекомендациями стандартов на ремонтные операции. Операция ремонта узла должна быть экономически целесообразной, поскольку процесс замены дефектных компонентов на уже собранной плате в ТПМК чрезвычайно трудоемок и чреват внесением дополнительных дефектов. Поэтому должны учитываться многие факторы, в том числе стоимость узла, дефектного компонента, трудозатраты на ремонт и другие. Дешевые сборки целесообразнее выбрасывать, нежели ремонтировать.

Демонтаж сложных компонентов поверхностного монтажа является прецизионной, требующей исключительной аккуратности выполнения, операцией из-за высокой плотности монтажа. Тепло, необходимое для отпайки компонента, может оказать воздействие на соседние чувствительные к нагреву компоненты и повредить саму ПП. Учет на стадии проектирования требований по обеспечению ремонтпригодности изделия, как правило, налагает определенные ограничения на процессы сборки и монтажа и в некоторой степени снижает плотность монтажа.

При демонтаже компонентов в корпусах сложной конфигурации доминирующим способом теплопередачи становится конвекция. Обычное приспособление для демонтажа забракованных компонентов оснащено нагревательными капиллярами (для разогрева мест пайки) со сменными наконечниками, рассчитанными на различные формы и размеры компонентов. Капилляры с наконечниками сконструированы таким образом, что струя горячего газа (обычно воздуха) направляется на выводы компонента, а не на его тело. Удаление дефектного и установка на его место исправного компонента производится с помощью вакуумного пинцета; в ряде случаев используется микроскоп, который обеспечивает контроль точности позиционирования устанавливаемого компонента. Типичная операция по исправлению брака на ремонтном участке может занять до

30 минут при замене сложного пластмассового кристаллоносителя с выводами и включает следующие этапы.

1. Подготовка платы к демонтажу компонента:

- очистка паяных соединений (удаление загрязнений и конформных покрытий с помощью растворителя или абразивного материала);
- снятие теплоотвода (если он имеется);
- защита соседних компонентов;
- покрытие флюсом концов выводов компонента, припаянных на контактных площадках платы, с целью обеспечения надежного расплавления припоя.

2. Разогрев паяных соединений:

- предварительный разогрев микросборки;
- разогрев выводов исключительно горячим газом (воздухом или азотом).

3. Снятие компонента со знакоместа с помощью вакуумного пинцета (при этом нерасплавившийся адгезив может вызвать затруднения).

4. Очистка платы (удаление остатков флюса, загрязнений и излишков припоя).

5. Защита подготовленного знакоместа, если замена компонента откладывается.

6. Замена компонента:

- нанесение флюса на концы выводов компонента и места пайки с последующим их облуживанием;
- позиционирование компонента с помощью вакуумного пинцета под наблюдением оператора;
- оплавление припоя горячим газом;
- очистка платы после пайки с целью удаления продуктов разложения флюса.

Исправление брака в сущности сводится к повторному выполнению определенной части сборочно-монтажных операций. При ремонте изделий необходим тщательный контроль и управление процессом устранения брака, чтобы исключить возможность повреждения (либо ухудшения электрофизических характеристик) годного (заменяющего бракованный) компонента, а также соседних компонентов и элементов коммутационной платы. Надежной гарантией от проблем, связанных с ремонтом изделий в ТПМК, является обеспечение высокого качества процесса сборки и обязательный контроль процесса монтажа.

12. ИСПЫТАНИЯ УЗЛОВ

Испытания РЭА представляют собой экспериментальное определение при различных воздействиях количественных и качественных характеристик изделий при их функционировании. При этом как сами испытываемые изделия, так и воздействия могут быть смоделированы. Цели испытаний различны на различных этапах проектирования и изготовления РЭА. К основным целям испытания, общим для всех видов РЭА, можно

отнести: выбор оптимальных конструктивно-технологических решений при создании новых изделий; доводку изделий до необходимого уровня качества; объективную оценку качества изделий при их постановке на производство, в процессе производства и при техническом обслуживании; прогнозирование гарантированного срока службы.

Испытания служат эффективным средством выявления скрытых случайных дефектов материалов и элементов конструкции, не обнаруженных методами технического контроля. По результатам испытаний изделий в производстве разработчик РЭА устанавливает причины снижения качества. Если эти причины установить не удастся, совершенствуют методы и средства контроля изделий и ТП их изготовления.

На конечных этапах ТП изготовления изделий могут проводиться предварительные испытания. Для них выбирают такие режимы, чтобы они обеспечивали отказы изделий, содержащих скрытые дефекты, и в то же время не вырабатывали ресурса тех изделий, которые не содержат дефектов, вызывающих при эксплуатации отказы. Эти испытания часто называют технологическими тренировками (термотоковая тренировка, электротренировка, тренировка термоциклами и др.).

Программа и методы проведения испытаний определяются конкретным видом и назначением РЭА, а также условиями эксплуатации. Для контроля качества и приемки изделий устанавливают основные категории контрольных испытаний, оговоренные в ТУ: приемо-сдаточные, периодические и типовые.

Каждая категория испытаний может включать несколько видов испытаний (электрические, механические, климатические, на надежность и др.) и видов контроля (визуальный, инструментальный и др.). В зависимости от особенностей эксплуатации и назначения изделий, а также специфики их производства некоторые виды испытаний выделяют в отдельные категории испытаний (на надежность – безотказность, долговечность, сохраняемость и др.). Виды испытаний и контроля, последовательность проведения, проверяемые параметры и их значения устанавливаются в нормативных документах (стандартах, программах, методиках и др.).

Во время испытаний применяют сплошной или выборочный контроль. Результаты испытаний считаются отрицательными, если обнаружено несоответствие изделия хотя бы одному требованию ТУ для проводимой категории испытаний. Применяемые средства испытаний, измерения и контроля, а также методики измерений должны соответствовать требованиям метрологического обеспечения. Средства испытаний должны иметь метрологическую аттестацию.

Приемо-сдаточные испытания (ПСИ) проводят для контроля изделия на соответствие требованиям ТУ, установленным для данной категории испытаний. Испытания и приемку проводит представитель заказчика в присутствии представителя отдела технического контроля (ОТК) предприятия-изготовителя в объеме и последовательности, предусмотренными в ТУ на изделие. О готовности изделия к ПСИ предприятие-

изготовитель уведомляет представителя заказчика извещением, оформленным в установленном порядке. К извещению прикладываются протоколы технологической тренировки и предъявительских испытаний, выполненных по форме, принятой на предприятии-изготовителе.

Ниже приведена примерная программа ПСИ для РЭА, входящей в 8-ю группу по условиям эксплуатации (см. рис. 3.1).

1. Контроль проведения технологической тренировки (проверка наличия протокола тренировки).
2. Проверка комплектности и качества эксплуатационной документации.
3. Проверка маркировки.
4. Проверка изделия на соответствие требованиям конструкторской документации.
5. Проверка покупных изделий и материалов на срок службы и срок сохраняемости.
6. Проверка переходного сопротивления.
7. Проверка электрической прочности изоляции.
8. Проверка электрического сопротивления изоляции.
9. Испытание на прочность при воздействии синусоидальной вибрации одной частоты.
10. Проверка потребляемых токов.
11. Проверка при изменении напряжения питания.
12. Проверка запаса регулировки.
13. Испытание на взаимозаменяемость составных частей.
14. Испытание на воздействие акустического шума.
15. Испытание на устойчивость к воздействию синусоидальной вибрации.
16. Проверка массы.
17. Проверка качества упаковки.

Состав и последовательность проведения испытаний могут быть изменены по согласованию с представителем заказчика. Принятыми считаются изделия, выдержавшие испытания, укомплектованные и упакованные в соответствии с ТУ.

Периодические испытания проводят с целью периодического контроля стабильности ТП в период между испытаниями и подтверждения возможности продолжения изготовления изделий по действующим конструкторской и технологической документации. Календарные сроки испытаний устанавливаются в графике, составленном предприятием-изготовителем с участием представителя заказчика. Периодическим испытаниям подвергается одно изделие ежегодно. Результаты испытаний оформляются актом, к которому прилагается протокол, выполненный по форме, принятой на предприятии-изготовителе.

Состав и последовательность проведения испытаний согласовываются с представителем заказчика.

Если изделие выдержало периодические испытания, то его производство продолжается до следующего срока испытаний. Если изделие не

выдержало периодических испытаний, то приемку изделий и отгрузку принятых изделий приостанавливают до выявления и устранения причин возникновения дефектов и получения положительных результатов повторных испытаний.

Типовые испытания проводят для изделий прерывистого производства (единичного и мелкосерийного прерывистого производства) для оценки эффективности и целесообразности предлагающихся изменений в изделие или технологию его изготовления, которые могут изменить технические и другие характеристики изделия и его эксплуатацию. Испытания проводят на изделиях, в которые внесены предлагающиеся изменения, по программе и методике необходимых испытаний из состава приемосдаточных и периодических.

Если эффективность и целесообразность предлагаемых изменений подтверждается результатами типовых испытаний, то их вносят в соответствующую документацию на изделие в соответствии с требованиями Государственных стандартов.

Перед предъявлением изделий на испытания и приемку представителю заказчика ОТК проводит предъявительские испытания готовых изделий. Такие испытания проводятся с целью контроля изделий на соответствие требованиям ТУ и готовности для предъявления заказчику. Как правило, их проводят в объеме не менее приемосдаточных испытаний, но планы контроля и нормы на проверяемые параметры могут устанавливаться более жесткими. Документация по испытаниям согласуется с заказчиком.

Основным организационно-методическим документом при испытаниях РЭА является программа испытаний. Она регламентирует цели испытаний, объем и методику проводимых исследований; порядок, условия, место и сроки проведения испытаний; ответственность за обеспечение и проведение испытаний; ответственность за оформление протоколов и отчетов.

Общие цели контрольных, сравнительных и определительных испытаний, общие положения об испытаниях на воздействие механических и климатических факторов конкретизированы в Государственных стандартах. В программе испытаний в краткой форме излагается информация об объекте испытания (срок его изготовления, номер паспорта, особенность конструкции и технологии изготовления и т. п.), а также параметры, подлежащие прямому или косвенному измерению, критерии годности изделия РЭА, требования к внешнему виду и электрические параметры. В разделах программы испытаний указывают объем и методику испытаний, в которых даются сведения о количестве испытываемых изделий, общая продолжительность испытаний при различных воздействующих факторах, о периодичности, составе и последовательности испытаний, о параметрах испытательных режимов, пределах изменения питающих напряжений и продолжительности работы РЭА при этих напряжениях и т. п.

В плане испытаний указывают необходимые работы, такие как изготовление образцов, их приемка ОТК, измерение и определение парамет-

ров, подготовка испытательного оборудования, проведение испытаний, оформление результатов, согласование и утверждение протокола испытаний и т. п.

Вторым организационно-методическим документом является методика испытаний РЭА. В ней излагаются: метод, средства и условия испытаний, алгоритмы выполнения операций по определению одной или нескольких взаимосвязанных характеристик свойств объекта, формы представления данных и методы оценивания точности, достоверности результатов, требования техники безопасности и охраны окружающей среды. Основным требованием к методике является обеспечение максимальной эффективности процесса испытаний и минимально возможные погрешности полученных результатов. Она включает требования к методу и условиям испытаний и техническим средствам. Методика испытаний должна содержать описание следующих этапов процесса испытаний: проверку испытательного оборудования, подготовку испытываемых изделий, совместную проверку испытательного оборудования и испытуемого изделия, регистрацию результатов испытаний и данных об условиях их проведения.

Испытание на воздействие внешних факторов предназначено для определения с некоторой долей вероятности способности изделий сохранять работоспособность и параметры в заданных условиях окружающей среды путем имитации реальных условий окружающей среды или путем воспроизведения их воздействий.

Когда возникает необходимость в проведении испытаний РЭА международного использования на воздействие внешних факторов, следует пользоваться методами испытаний, указанными в СТ МЭК 68-2, за исключением тех случаев, когда соответствующий метод испытаний отсутствует. Для этого имеются следующие основания:

- а) полное соответствие с методами испытания СТ МЭК 68-2 необходимо для обеспечения повторяемости и воспроизводимости результатов;
- б) испытания СТ МЭК 68-2 подходят для применения к разнообразным образцам. Они разработаны независимо от вида испытуемого образца. Образец может не быть электротехническим изделием;
- в) результаты, полученные в различных лабораториях, могут быть сопоставимы;
- г) исключается распространение мало отличающихся друг от друга методов испытаний и оборудования;
- д) длительное использование одного и того же испытания позволяет сравнивать результаты предыдущих испытаний образцов, технические характеристики которых в условиях эксплуатации известны.

Испытания характеризуют посредством задания параметров испытательных режимов, а не описанием испытательных средств. Для некоторых испытаний необходимо описать испытательное оборудование.

Выбирая метод испытания, который следует применять, разработчик нормативно-технологической документации (НТД) должен всегда учитывать экономические аспекты, в частности, когда существует два различ-

ных испытания, по результатам которых может быть получена одинаковая информация.

Если при раздельном воздействии двух или более внешних факторов не обеспечивается получение желаемой информации, следует воспользоваться комбинированными или составными испытаниями. Самые важные комбинированные и составные испытания даны в СТ МЭК 68-2.

В соответствии с Государственным стандартом механические и климатические испытания проводят с целью проверки соответствия изделий РЭА требованиям, установленным в ТЗ, стандартах и ТУ на изделия конкретных классов и типов. Испытаниям подвергается РЭА или отдельные ее части, число которых устанавливают в ТУ на изделия и в программе испытаний.

Все испытания проводят в нормальных климатических условиях (за исключением климатических), которые характеризуются следующими значениями параметров:

- температура воздуха 15... 35 °С;
- относительная влажность воздуха 45... 80 %;
- атмосферное давление 84... 106 кПа (630...800 мм рт. ст.).

Испытания последовательно включают в себя начальную стабилизацию (если требуется); начальную проверку и измерения (если требуется); выдержку; конечную стабилизацию (если требуется); заключительные проверки и измерения (если требуется).

При механических испытаниях проводится определение прочности и устойчивости конструкции изделия при воздействии вибраций, ударов, линейных ускорений, акустического шума.

При климатических испытаниях изделие подвергается воздействию повышенной и пониженной температур, термоциклирования, повышенной и пониженной влажности, давления, инея, росы, соляного тумана и т.п.

При испытаниях на соответствие конструктивно-технологическим требованиям изделие подвергают воздействию агрессивных сред, испытанию на герметичность, на способность к пайке, на теплостойкость при пайке, на пожаробезопасность, взрывозащищенность и другие.

Диапазон параметров воздействующих факторов, применяемых при испытаниях весьма широк, и зависит от класса аппаратуры и условий ее эксплуатации.

13. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА НА ПРЕДПРИЯТИИ

Такие этапы изготовления РЭА как разработка и проектирование конструкторской и технологической документации могут проводиться практически в любых условиях, включая офисные помещения. Главное требование на современном этапе – наличие автоматизированного места разработчика с компьютером и соответствующим ПО. Даже большую часть работ по макетированию отдельных узлов возможно проводить с помощью современных программных средств, что значительно экономит время и снижает себестоимость новых разработок. Однако при выпуске

даже опытного промышленного образца или установочной серии не обойтись без организации производственного процесса с его инфраструктурой.

С производственно-хозяйственной точки зрения предприятия есть относительно обособленные образования, представляющие собой целостный организм, в котором предполагаются социальное единство, производственно-техническое единство, а также организационно-административное единство и финансово-экономическая самостоятельность.

Социальное единство предполагает формирование коллектива работников, состоящего из различных групп (управленческого персонала, инженерно-технических работников и служащих, основных и вспомогательных рабочих, обслуживающего персонала) для достижения поставленной цели перед предприятием.

Производственно-техническое единство предусматривает соответствие основных фондов предприятия (оборудования и площадей) характеру определенной деятельности; полноту и последовательность всех технологических процессов; единство технического и производственного руководства в лице главного инженера, являющегося первым заместителем руководителя предприятия.

Организационно-административное единство предполагает наличие единого управленческого аппарата и наличия единой для всего предприятия системы документооборота. Во главе предприятия как совокупности составляющих его производственных единиц (цехов, участков, служб и т. д.) стоит руководитель (директор, управляющий), осуществляющий на основе принципа единоначалия руководство всеми сторонами его деятельности.

Финансово-экономическая самостоятельность означает единство материальной базы предприятия в виде имущества и финансов и рентабельность работы.

Предприятие – это сложная вероятностная система управления производством, основанная на использовании законов кибернетики, экономико-математических методов, теории информации, системно-комплексного подхода, организационной и электронно-вычислительной техники.

13.1. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ПРОЦЕСС

Производственный процесс представляет собой совокупность взаимосвязанных основных, вспомогательных и обслуживающих процессов в целях создания востребованной продукции для производственного или личного потребления (рис. 13.1).

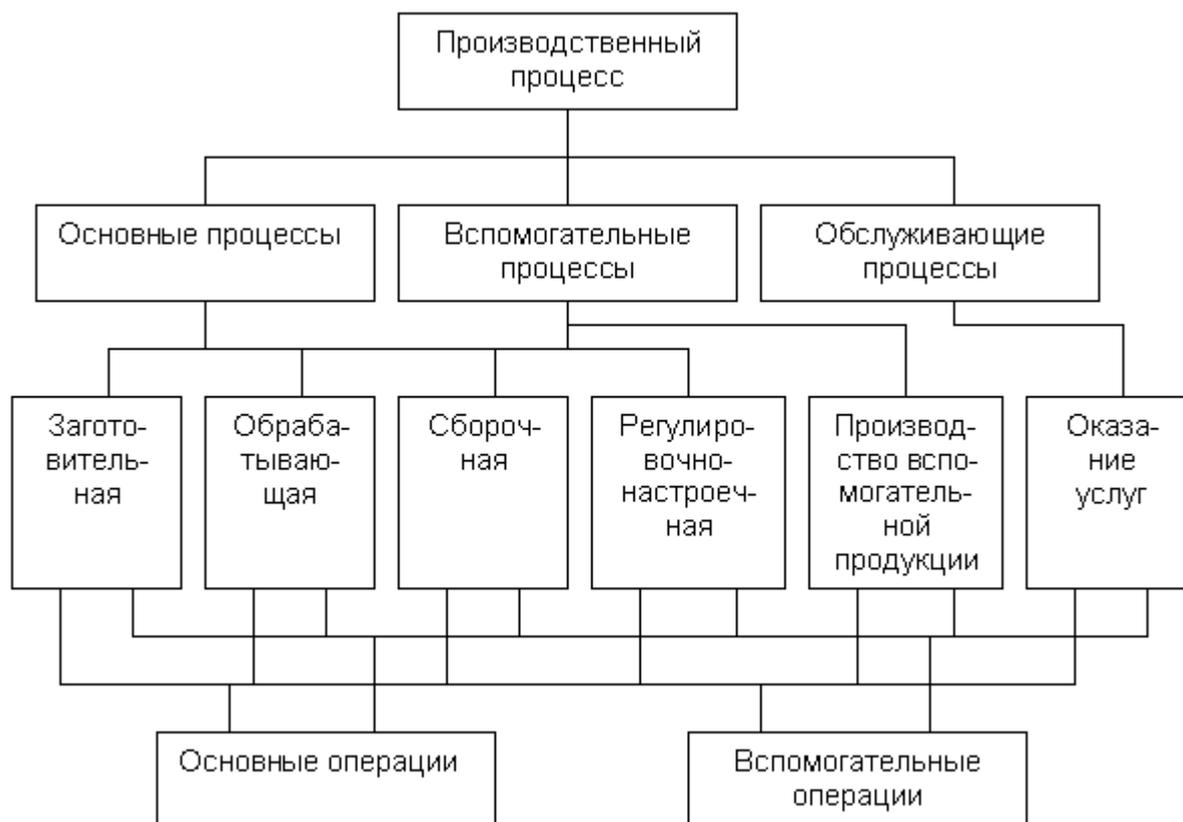


Рис. 13.1. Структура производственного процесса.

Основные производственные процессы – это та часть процессов, в ходе которых происходит непосредственное изменение форм, размеров, свойств, внутренней структуры предметов труда и превращение их в готовую продукцию. Например, процессы изготовления деталей и сборки из них узлов и изделия в целом.

К *вспомогательным производственным процессам* относятся такие процессы, результаты которых используются либо непосредственно в основных процессах, либо обеспечивают их бесперебойное и эффективное протекание. Примерами таких процессов являются подготовка инструментов и оснастки, запасных частей для ремонта оборудования, производство на предприятии всех видов энергии (электрической энергии, сжатого воздуха, азота и т. д).

Обслуживающие производственные процессы – это процессы труда по оказанию услуг, необходимых для осуществления основных и вспомогательных производственных процессов. Например, транспортные операции, складские операции, технический контроль качества продукции и др.

Основные, а в некоторых случаях и вспомогательные производственные процессы протекают в разных стадиях (или фазах). *Стадия* – это обособленная часть производственного процесса, когда предмет труда переходит в другое качественное состояние. Например, материал переходит в заготовку, заготовка – в деталь и т. д.

Основные производственные процессы протекают в следующих стадиях: заготовительной, обрабатывающей, сборочной и регулировочно-настроечной.

Современные тенденции развития обрабатывающих и заготовительных стадий заключаются в поиске ресурсосберегающих технологий воздействия на материалы и заготовки.

Сборочная (сборочно-монтажная) стадия – это производственный процесс, в результате которого получают сборочные единицы (узлы, блоки) или готовые изделия. Различают две основные организационные формы сборки: стационарную и подвижную. Стационарная сборка – это когда изделие изготавливается на одном рабочем месте (детали подаются). При подвижной сборке изделие создается в процессе его перемещения от одного рабочего места к другому.

Регулировочно-настроечная стадия – заключительная в структуре производственного процесса, которая проводится с целью получения необходимых технических параметров готового изделия. В качестве орудий труда на этой стадии выступают контрольно-измерительная аппаратура и специальные стенды для испытаний.

Составными элементами стадий основного и вспомогательного процессов являются *технологические операции (ТО)*. Деление производственного процесса на операции, а далее на приемы и движения необходимо для разработки технически обоснованных норм времени выполнения операций.

Операция – часть производственного процесса, которая, как правило, выполняется на одном рабочем месте без переналадки оборудования и одним или несколькими работниками.

Технологические операции состоят из *установов* (часть ТО при неизменном закреплении детали или узла) и *переходов*.

Технологический переход – законченная часть технологической операции, характеризующаяся постоянством применяемого инструмента и поверхностей, образуемых обработкой или соединяемых при сборке.

Вспомогательный переход – законченная часть технологической операции, которая не сопровождается изменением формы или состояния заготовки, но необходима для выполнения технологического перехода (установка заготовки, ее закрепление и т.д.).

Рабочий ход – законченная часть перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки и сопровождающееся изменением свойств или формы заготовки.

Вспомогательный ход (холостой ход) – законченная часть перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки и не сопровождающееся изменением свойств или формы заготовки.

В зависимости от степени технического оснащения производственного процесса различают ручные операции, автоматизированные и автоматические.

Организация производства обеспечивает движение предметов труда

в производственном процессе таким образом, что результат труда одного рабочего места становится исходным предметом для другого. Рациональная связь во времени и пространстве между основными, вспомогательными и обслуживающими процессами, между рабочими местами в целом по предприятию во многом определяет результаты его производственно-хозяйственной деятельности, экономические показатели его работы, себестоимость продукции и рентабельность производства.

13.2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

При всем многообразии производственных процессов их организация подчиняется некоторым общим принципам:

- дифференциации,
- концентрации и интеграции,
- специализации,
- пропорциональности,
- прямооточности,
- непрерывности, параллельности,
- ритмичности, автоматичности,
- профилактики,
- гибкости,
- оптимальности,
- стандартизации и др.

Принцип дифференциации предполагает разделение производственного процесса на отдельные технологические процессы, которые в свою очередь подразделяются на операции, переходы, приемы и движения. При этом анализ особенностей каждого элемента позволяет выбрать наилучшие условия для его осуществления, обеспечивающие минимизацию суммарных затрат всех видов ресурсов. Так, поточное производство многие годы развивалось за счет все более глубокой дифференциации технологических процессов. Выделение непродолжительных по времени выполнения операций позволяло упрощать организацию и технологическое оснащение производства, совершенствовать навыки рабочих, увеличивать производительность их труда.

Однако чрезмерная дифференциация повышает утомляемость рабочих на ручных операциях за счет монотонности и высокой интенсивности процессов производства. Большое число операций приводит к излишним затратам на перемещение предметов труда между рабочими местами, установку, закрепление и снятие их с рабочих мест после окончания операций.

При использовании современного высокопроизводительного гибкого оборудования (станки с ЧПУ, обрабатывающие центры, роботы и т. д.) принцип дифференциации переходит в *принцип концентрации операций и интеграции* производственных процессов. Принцип концентрации предполагает выполнение нескольких операций на одном рабочем месте

(универсальное многоцелевое сборочное оборудование). Принцип интеграции состоит в объединении основных вспомогательных и обслуживающих процессов.

Принцип специализации представляет собой форму разделения общественного труда, которая, развиваясь планомерно, обуславливает выделение на предприятии цехов, участков, линий и отдельных рабочих мест. Они изготавливают продукцию ограниченной номенклатуры и отличаются особым производственным процессом.

Сокращение номенклатуры выпускаемой продукции, как правило, приводит к улучшению всех экономических показателей, в частности, к повышению уровня использования основных фондов предприятия, снижению себестоимости продукции, улучшению качества продукции, механизации и автоматизации производственных процессов. Специализированное оборудование при всех прочих равных условиях работает производительнее.

Принцип пропорциональности предполагает равную пропускную способность всех производственных подразделений, выполняющих основные, вспомогательные и обслуживающие процессы. Нарушение этого принципа приводит к возникновению «узких» мест в производстве или, наоборот, к неполной загрузке отдельных рабочих мест, участков, цехов, к снижению эффективности функционирования всего предприятия. Поэтому для обеспечения пропорциональности проводятся расчеты производственной мощности как по стадиям производства, так и по группам оборудования и производственным площадям.

Принцип прямоточности означает такую организацию производственного процесса, при которой обеспечиваются кратчайшие пути прохождения деталей и сборочных единиц по всем стадиям и операциям. Поток материалов, полуфабрикатов и сборочных единиц должен быть без встречных и возвратных движений. Это обеспечивается соответствующей планировкой расстановки оборудования по ходу технологического процесса. Классическим примером такой планировки является поточная линия.

Принцип непрерывности означает, что работник трудится без простоев, оборудование работает без перерывов, предметы труда не пролеживают на рабочих местах. Наиболее полно этот принцип проявляется в массовом или крупносерийном производстве при организации поточных методов производства, в частности при организации одно- и многопредметных непрерывно-поточных линий. Этот принцип обеспечивает сокращение цикла изготовления изделия и тем самым способствует повышению эффективности производства.

Принцип параллельности предполагает одновременное выполнение частичных производственных процессов и отдельных операций над аналогичными деталями и частями изделия на различных рабочих местах. Параллельность в организации производственного процесса применяется в формах многоинструментальной обработки в структуре технологической операции или в форме параллельного выполнения основных и

вспомогательных элементов операций. Принцип параллельности обеспечивает сокращение продолжительности производственного цикла и экономии рабочего времени.

Принцип ритмичности обеспечивает выпуск одинаковых или возрастающих объемов продукции за равные периоды времени и соответственно повторение через эти периоды производственного процесса на всех его стадиях и операциях. При узкой специализации производства и устойчивой номенклатуре изделий ритмичность может быть обеспечена непосредственно по отношению к отдельным изделиям и определяется количеством обрабатываемых или выпускаемых изделий за единицу времени. В условиях широкой и изменяющейся номенклатуры выпускаемых производственной системой изделий ритмичность работы и выпуска продукции может измеряться только с помощью трудовых или стоимостных показателей.

Принцип автоматичности предполагает максимальное выполнение операций производственного процесса автоматически, только под наблюдением и контролем оператора. Автоматизация процессов приводит к увеличению объемов выпуска изделий, к повышению качества работ, к исключению ручного труда на работах с вредными условиями. Особенно важна автоматизация обслуживающих процессов. Автоматизированные транспортные средства и склады выполняют функции не только по передаче и хранению объектов производства, но могут регламентировать ритм всего производства. Общий уровень автоматизации процессов производства определяется долей автоматизированных работ в основном, вспомогательном и обслуживающем производствах в общем объеме работ предприятия.

Принцип профилактики предполагает организацию обслуживания оборудования, направленную на предотвращение аварий и простоев технических систем. Это достигается с помощью системы планово-предупредительных ремонтов (ППР).

Принцип гибкости позволяет с наименьшими затратами времени и средств на переналадку оборудования перейти на выпуск новой продукции. Наибольшее развитие этот принцип получает в условиях производства, где используются станки с ЧПУ, обрабатывающие центры (ОЦ), переналаживаемые автоматические средства контроля, складирования и перемещения объектов производства. Особое значение в современном производстве приобретает программное обеспечение высокоинтеллектуального оборудования.

Принцип оптимальности состоит в том, что выполнение всех процессов по выпуску продукции в заданном количестве и в сроки осуществляется с наибольшей экономической эффективностью или с наименьшими затратами трудовых и материальных ресурсов.

Принцип стандартизации предполагает широкое использование при создании и освоении новой техники и новой технологии стандартизации, унификации, типизации и нормализации, что позволяет избежать необоснованного многообразия в материалах, оборудовании, технологи-

ческих процессах и резко сократить продолжительность цикла создания и освоения новой техники (СОНТ).

Разумное сочетание указанных основных принципов при проектировании и организации производственного процесса является залогом построения эффективного предприятия.

13.3. ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ И СТРУКТУРА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦИКЛА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ

При преобразовании предметов производства в конкретное изделие они проходят через множество основных, вспомогательных и обслуживающих процессов, протекающих параллельно, параллельно-последовательно или последовательно во времени в зависимости от сложившейся на предприятии производственной структуры, типа производства, уровня специализации производственных подразделений, форм организации производственных процессов и других факторов. Совокупность этих процессов, обеспечивающих изготовление изделия, принято называть производственным циклом, основными характеристиками которого являются его продолжительность и структура.

Продолжительность производственного цикла изготовления продукции (независимо от числа одновременно изготавливаемых деталей или изделий) – это календарный период времени, в течение которого материалы, полуфабрикаты и комплектующие изделия превращаются в готовую продукцию.

Продолжительность производственного цикла, как правило, выражается в календарных днях или часах (при малой трудоемкости изделий).

Знание продолжительности производственного цикла изготовления всех видов продукции (от изготовления заготовок, деталей до сборки изделий) необходимо:

- для составления производственной программы предприятия и его подразделений;
- для определения сроков начала производственного процесса (запуска) по данным сроков его окончания (выпуска);
- для расчетов нормальной величины незавершенного производства.

Продолжительность производственного цикла зависит от времени трудовых и естественных процессов, а также от времени перерывов в производственном процессе (рис. 13.2).



Рис. 13.2. Структура производственного цикла.

В течение трудовых процессов выполняются технологические и нетехнологические операции. К технологическим относятся операции, в результате которых изменяются внешний вид и внутреннее содержание предметов труда, а также подготовительно-заключительные работы. Их продолжительность зависит от типа производства, его технической оснащенности, прогрессивности технологии, приемов и методов труда и других факторов.

Время выполнения технологических операций в производственном цикле составляет технологический цикл ($T_{ц}$). Время выполнения одной операции, в течение которого изготавливается одна деталь, партия одинаковых деталей или несколько различных деталей, называется операционным циклом ($T_{оп}$).

К нетехнологическим относятся операции по транспортировке предметов труда и контролю качества продукции.

Естественными считаются такие процессы, которые связаны с охлаждением деталей после термообработки, с сушкой после окраски деталей или других видов покрытия и со старением металла.

Перерывы в зависимости от вызвавших их причин могут быть подразделены на межоперационные (внутрицикловые), межцеховые и междусменные.

Межоперационные перерывы обусловлены временем партионности и ожидания и зависят от характера обработки партии деталей на опера-

циях. Перерывы партионности происходят потому, что каждая деталь, поступая на рабочее место в составе партии аналогичных деталей, пролеживает дважды: один раз до начала обработки, а второй раз по окончании обработки, пока вся партия не пройдет через данную операцию.

Перерывы ожидания вызываются несогласованной продолжительностью смежных операций технологического процесса. Эти перерывы возникают в тех случаях, когда предыдущая операция заканчивается раньше, чем освобождается рабочее место, предназначенное для выполнения следующей операции.

Межцеховые перерывы обусловлены тем, что сроки окончания производства составных частей деталей сборочных единиц в разных цехах различны и детали пролеживают в ожидании комплектности. Это пролеживание (перерывы комплектования) происходит при комплектно-узловой системе планирования, т. е. тогда, когда готовые заготовки, детали или узлы должны «пролеживать» в связи с незаконченностью других заготовок, деталей, узлов, входящих совместно с первыми в один комплект. Как правило, такие перерывы возникают при переходе продукции от одной стадии производства к другой или из одного цеха в другой.

Междусменные перерывы обусловлены режимом работы предприятия и его подразделений. К ним относятся выходные и праздничные дни, перерывы между сменами (при двухсменном режиме третья смена) и обеденные перерывы (условно).

Структура и продолжительность производственного цикла зависят от типа производства, уровня организации производственного процесса и других факторов. Для изделий РЭА характерна высокая доля технологических операций в общей продолжительности производственного цикла.

Практические мероприятия по сокращению производственного цикла вытекают из принципов построения производственного процесса и в первую очередь из принципов пропорциональности, параллельности и непрерывности.

Сокращение времени трудовых процессов в части операционных циклов достигается путем совершенствования технологических процессов, а также повышения *технологичности конструкции* изделия, под которой понимают максимальное приближение конструктивных особенностей изделия к способам реализации этих особенностей в производстве.

Продолжительность транспортных операций может быть значительно уменьшена в результате перепланировки оборудования на основе принципа прямоточности, механизации и автоматизации подъема и перемещения продукции с помощью различных подъемно-транспортных средств.

Наладку оборудования, как правило, необходимо выполнять в нерабочие смены, в обеденные и другие перерывы. Продолжительность естественных процессов уменьшается за счет замены их соответствующими технологическими операциями. Например, естественная сушка некоторых окрашенных деталей может быть заменена индукционной сушкой в поле токов высокой частоты со значительным (в 5-7 раз) ускорением процесса.

Время межоперационных перерывов может быть значительно уменьшено в результате перехода от последовательного к последовательно-параллельному и далее к параллельному виду движений предметов труда. Оно также может быть сокращено за счет организации цехов и участков предметной специализации. Обеспечивая территориальное сближение различных стадий производства, предметное строение цехов и участков позволяет значительно упростить внутризаводские и внутрицеховые маршруты движения уменьшить время на передачи.

Для вскрытия резервов сокращения производственного цикла (как трудовых процессов, так и перерывов) в практике прибегают к фотографии производственного цикла. Анализируя данные фотографии, можно выявить резервы сокращения продолжительности производственного цикла по каждому его элементу.

13.4. ПРИМЕРНАЯ СТРУКТУРА ПРЕДПРИЯТИЯ

В соответствии со структурой производственного процесса на любом предприятии радиоэлектронного приборостроения различают основные, вспомогательные и побочные цехи и обслуживающие хозяйства. Их состав, а также формы производственных связей между ними принято называть производственной структурой предприятия (рис. 13.3).

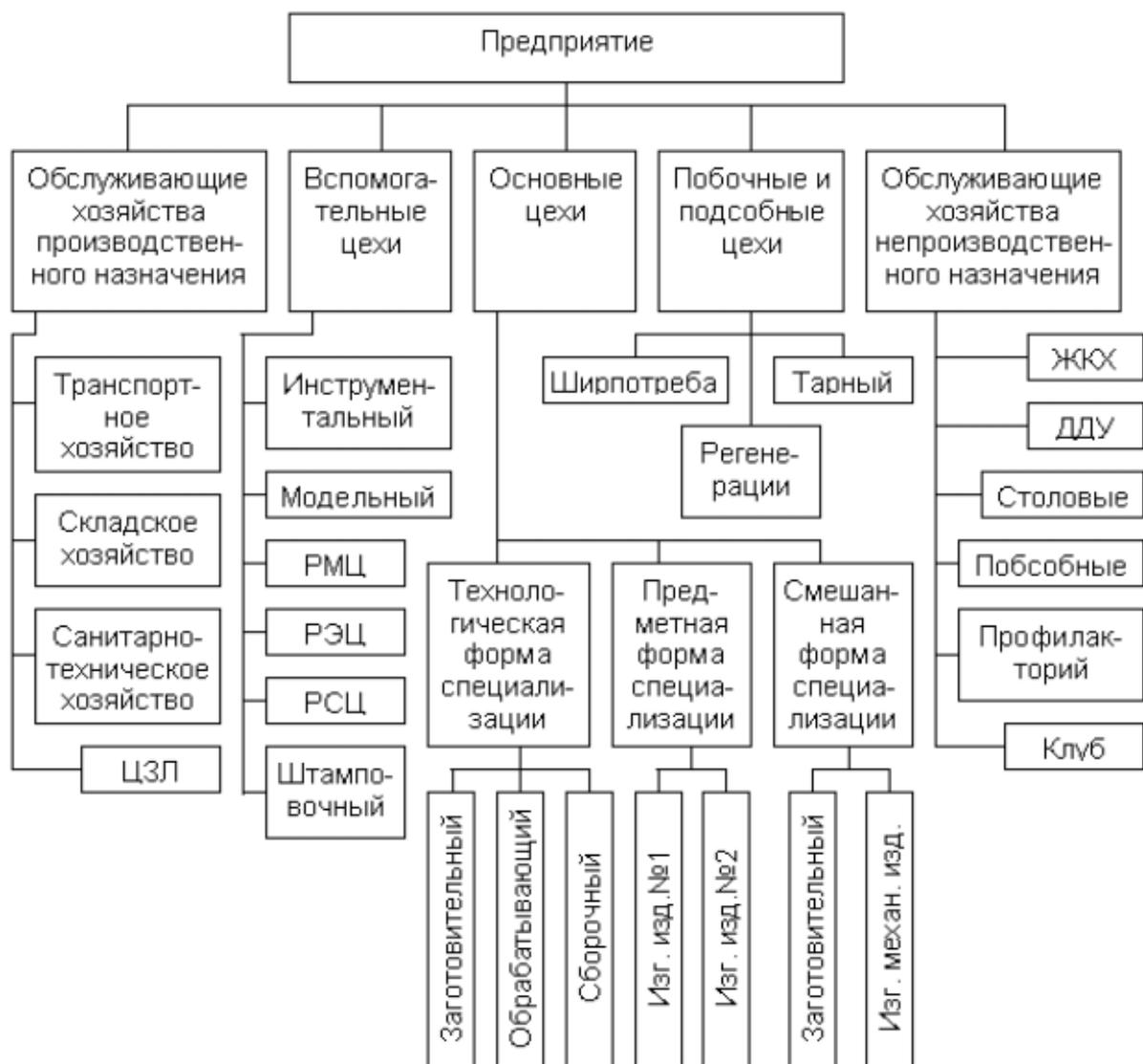


Рис. 13.3. Общая структура предприятия.

Цех – организационно обособленное подразделение предприятия, состоящее из ряда производственных и вспомогательных участков и обслуживающих звеньев. Цех выполняет определенные ограниченные производственные функции, обусловленные характером кооперации труда внутри предприятия. На большинстве промышленных предприятий цех является их основной структурной единицей. Часть мелких и средних предприятий может быть построена по бесцеховой структуре. В этом случае предприятие делится непосредственно на производственные участки. Некоторые наиболее крупные предприятия в организационно-административном отношении строятся по корпусной системе на основе объединения под единым руководством ряда цехов и хозяйств.

К цехам основного производства относятся цехи, изготовляющие основную продукцию предприятия:

- заготовительные (литейные, кузнечно-прессовые и др.);
- обрабатывающие (механической обработки деталей, холодной штамповки, термические, гальванические, химические и др.);
- сборочные (узловой сборки, генеральной сборки, монтажные, регу-

лировочно-настроечные и др.).

К вспомогательным относятся цехи, которые способствуют выпуску основной продукции, создавая условия для нормальной работы основных цехов: оснащают их инструментом и приспособлениями, обеспечивают запасными частями для ремонта оборудования и проводят плановые ремонты, обеспечивают энергетическими ресурсами. Важнейшими из этих цехов являются инструментальные, ремонтно-механические, ремонтно-энергетические, ремонтно-строительные, и др. Число вспомогательных цехов и их размеры зависят от масштаба производства и состава основных цехов.

Побочные цехи – это такие, в которых изготавливается продукция из отходов основного и вспомогательного производства либо осуществляется восстановление использованных вспомогательных материалов для нужд производства.

Подсобные цехи осуществляют подготовку основных материалов для основных цехов, а также изготавливают тару для упаковки продукции.

К обслуживающим хозяйствам производственного назначения относятся:

- складское хозяйство;
- транспортное хозяйство;
- санитарно-техническое хозяйство, объединяющее водопроводные, канализационные, вентиляционные и отопительные устройства;
- метрологическая служба и др.

Все они выполняют работу по обслуживанию основных, вспомогательных и побочных цехов.

Наряду с производственной различают общую структуру предприятий. Последняя, кроме производственных цехов и обслуживающих хозяйств производственного назначения, включает различные общезаводские службы, а также хозяйства и предприятия, связанные с капитальным строительством, охраной окружающей среды и культурно-бытовым обслуживанием работников, например жилищно-коммунальное хозяйство, подсобное хозяйство, столовые, профилактории, медицинские учреждения, клубы и т. п.

Объем выпуска продукции влияет на изменение производственной структуры, на сложность связей между цехами. Чем больше объем выпуска продукции, тем, как правило, уже специализация цехов.

Наряду с объемом решающее влияние на производственную структуру оказывает номенклатура продукции. Именно от нее зависит, должны ли цехи и участки быть приспособлены для производства строго определенной продукции или более разнообразной. Чем уже номенклатура продукции, тем относительно проще структура предприятия.

Формы специализации производственных подразделений определяют конкретный состав технологически и предметно специализированных цехов, участков предприятия, их размещение и производственные связи между ними, что является важнейшим фактором формирования производственной структуры.

Экономически целесообразные формы кооперирования предприятия с другими предприятиями по выпуску различных видов продукции позволяют реализовывать часть производственных процессов вне данного предприятия и тем самым не создавать на предприятии часть тех или иных цехов и участков или обслуживающих хозяйств.

Структура предприятия должна обеспечивать наиболее рациональное и эффективное сочетание во времени и в пространстве всех звеньев производственного процесса.

Все многообразие производственных структур приборостроительных предприятий в зависимости от их специализации можно свести к следующим типам:

- заводы с полным технологическим циклом, располагающие всей совокупностью заготовительных, обрабатывающих и сборочных цехов;
- заводы сборочного типа, выпускающие готовые изделия из деталей и комплектующих, изготовляемых на других предприятиях;
- заводы, специализированные на производстве заготовок, как правило, построенные на принципах технологической специализации;
- заводы поддетальной специализации, производящие отдельные детали, блоки, узлы, сборочные единицы.

13.5. ФОРМЫ СПЕЦИАЛИЗАЦИЙ ОСНОВНЫХ ЦЕХОВ ПРЕДПРИЯТИЯ

Формы специализации основных цехов предприятий радиоэлектронного приборостроения зависят от стадий, в которых происходят производственные процессы, а именно: заготовительной, обрабатывающей и сборочной. Соответственно *специализация* принимает следующие формы: *технологическую, предметную или предметно-технологическую*.

При технологической форме специализации в цехах выполняется определенная часть технологического процесса, состоящая из нескольких однотипных операций при весьма широкой номенклатуре обрабатываемых деталей. При этом в цехах устанавливается однотипное оборудование, а иногда даже близкое по габаритам. Примером цехов технологической специализации могут служить гальванические; среди механообрабатывающих цехов – токарные, фрезерные, шлифовальные и др. В таких цехах, как правило, изготавливается вся номенклатура заготовок или деталей, либо если это сборочный цех, то в нем собираются все изделия, выпускаемые заводом.

Технологическая форма специализации цехов имеет свои преимущества и недостатки. При небольшом разнообразии операций и оборудования облегчается техническое руководство и создаются более широкие возможности регулирования загрузки оборудования. Технологическая форма специализации обеспечивает большую гибкость производства при освоении выпуска новых изделий и расширении изготавливаемой номенклатуры без существенного изменения уже применяемого оборудования и технологических процессов.

Однако эта форма специализации имеет и существенные недостатки. Она усложняет и удорожает внутризаводское кооперирование, ограничивает ответственность руководителей подразделений за выполнение только определенной части производственного процесса.

При использовании технологической формы специализации в заготовительных и обрабатывающих цехах складываются сложные, удлиненные маршруты движения предметов труда с неоднократным их возвращением в одни и те же цехи. Это нарушает принцип прямоточности, затрудняет согласование работы цехов и приводит к удлинению производственного цикла и, как следствие, к увеличению незавершенного производства.

По технологическому принципу преимущественно формируются цехи на предприятиях единичного и мелкосерийного производства, выпускающих разнообразную и неустойчивую номенклатуру изделий. По мере развития специализации производства, а также стандартизации и унификации изделий и их частей технологический принцип формирования цехов, как правило, дополняется предметным, при котором основные цехи создаются по признаку изготовления каждым из них определенного изделия либо его части.

Предметная форма специализации цехов характерна для заводов узкой предметной специализации. В цехах полностью изготавливаются закрепленные за ними детали или изделия узкой номенклатуры, например одно изделие, несколько однородных изделий или конструктивно-технологически однородных деталей.

Для цехов с предметной формой специализации характерны разнообразные оборудование и оснастка, но узкая номенклатура деталей или изделий. Оборудование подбирается в соответствии с технологическим процессом и располагается в зависимости от последовательности выполняемых операций, т. е. используется принцип прямоточности. Такое формирование цехов наиболее характерно для предприятий серийного и массового производства.

Предметная форма специализации цехов, так же как и технологическая, имеет свои преимущества и недостатки. К преимуществам можно отнести простое согласование работы цехов, так как все операции по изготовлению конкретного изделия (детали) сосредоточены в одном цехе. Все это приводит:

- к устойчивой повторяемости производственного процесса,
- к повышению ответственности руководителя цеха за выпуск продукции в установленные сроки, требуемого количества и качества,
- к упрощению оперативно-производственного планирования,
- к сокращению производственного цикла,
- к уменьшению числа и разнообразия маршрутов движения предметов труда,
- к сокращению потерь времени на переналадку оборудования,
- к уменьшению межоперационного времени и ликвидации межцехового пролеживания.

Опыт работы предприятий показывает, что при предметной форме специализации цехов, указанные выше преимущества приводят к повышению производительности труда рабочих и ритмичности производства, к снижению себестоимости продукции, росту прибыли и рентабельности и к улучшению других технико-экономических показателей.

Недостаток этой формы специализации весьма существенен: расширение номенклатуры выпускаемой продукции и увеличение разнообразия применяемого оборудования требует дорогостоящей реконструкции цехов.

Создание цехов, специализированных на выпуске ограниченной номенклатуры изделий, целесообразно лишь при больших объемах их выпуска. Только в этом случае загрузка оборудования будет достаточно полной, а переналадка оборудования, связанная с переходом на выпуск другого объекта, не будет вызывать больших потерь времени. В цехах создается возможность осуществлять замкнутый (законченный) цикл производства продукции. Такие цехи получили название предметно-замкнутые. В них иногда совмещаются заготовительная и обрабатывающая или обрабатывающая и сборочная стадии (например, механосборочный цех).

Технологическая и предметная формы специализации в чистом виде используются довольно редко. Чаще всего на многих предприятиях радиоэлектронного приборостроения применяют смешанную (предметно-технологическую) специализацию, при которой заготовительные цехи строятся по технологической форме, а обрабатывающие и сборочные цехи объединяются в предметно-замкнутые цехи или участки.

13.6. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ОСНОВНЫХ ЦЕХОВ ПРЕДПРИЯТИЯ

Под производственной структурой цеха понимают состав входящих в него производственных участков, вспомогательных и обслуживающих подразделений, а также связи между ними. Эта структура определяет разделение труда между подразделениями цеха, т. е. внутрицеховую специализацию и кооперирование производства.

Производственный участок как объединенная по тем или иным признакам группа рабочих мест представляет собой структурную единицу цеха, которая выделяется в отдельную административную единицу и возглавляется мастером при наличии в одну смену не менее 25 рабочих.

Рабочее место, являющееся первичным структурным элементом участка – закрепленная за одним рабочим или бригадой рабочих часть производственной площади с находящимися на ней орудиями и другими средствами труда, в том числе инструментами, приспособлениями, подъемно-транспортным и иными устройствами соответственно характеру работ, выполняемых на данном рабочем месте.

В основу формирования производственных участков, как и цехов, может быть положена технологическая или предметная форма специали-

зации.

При технологической специализации участки оснащаются однородным оборудованием (групповое расположение станков) для выполнения определенных операций технологического процесса. Так, механический цех может включать токарный, фрезерный, револьверный, сверлильный и другие участки.

Преимущества и недостатки технологической формы специализации участков такие же, как при формировании цехов в соответствии с этой формой специализации.

При предметной форме специализации цех разбивается на предметно-замкнутые участки, каждый из которых специализирован на выпуске относительно узкой номенклатуры изделий, имеющих схожие конструктивно-технологические признаки, и реализует законченный цикл их изготовления. Оборудование этих участков различное и располагается так, чтобы обеспечивалась более полная реализация принципа прямоточности движения закрепленных за участком деталей. В практической деятельности, как правило, выделяют три вида предметно-замкнутых участков:

- предметно-замкнутые участки по производству конструктивно и технологически однородных деталей (например, участки втулок, фланцев, шестерен и т.п.);

- предметно-замкнутые участки по производству конструктивно разнородных деталей, весь технологический процесс изготовления которых состоит, однако, из однородных операций и одинакового технологического маршрута (например, участок круглых деталей, участок плоских деталей и т. п.);

- предметно-замкнутые участки по производству всех деталей узла, подузла мелкой сборочной единицы или всего изделия (применяется некомплектная система оперативного планирования, в которой за плановую учетную единицу принимается узловый комплект).

Организация предметно-замкнутых участков обуславливает почти полное отсутствие производственных связей между участками, обеспечивает экономическую целесообразность использования высокопроизводительного специализированного оборудования и технологической оснастки, позволяет получать минимальную продолжительность производственного цикла изготовления деталей, упрощает управление производством внутри цеха. Другие преимущества и недостатки предметной формы специализации участков аналогичны преимуществам и недостаткам при формировании цехов по этой форме специализации.

В цехах предметной специализации могут быть созданы участки как предметной, так и технологической специализации, а в цехах технологической специализации – участки технологические, сформированные по группам оборудования и габаритам изделий.

Важной частью производственной структуры цеха является состав вспомогательных и обслуживающих подразделений. К ним относятся: участок ремонта оборудования и технологической оснастки, участок цен-

трализованной заточки инструмента. Эти участки разгружают вспомогательные цехи (ремонтно-механический, инструментальный и др.) от выполнения мелких заказов и срочных работ.

В состав обслуживающих структурных подразделений цехов основного производства входят: складские помещения (материальные и инструментальные кладовые), внутрицеховой транспорт (тележки, электрокары, конвейеры и др.) и пункты для осуществления технического контроля качества продукции, оснащенные контрольно-измерительной техникой.

13.7. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАТРАТ РАБОЧЕГО ВРЕМЕНИ. ТЕХНИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫЕ НОРМЫ

Количество продукции Q , выпускаемой в единицу времени T (1 час, смена, месяц и т.д.), характеризует производительность труда:

$$Q = 1/T \quad (13.1)$$

Время, необходимое на выполнение одной операции, называют трудоемкостью операции или нормой штучного времени $T_{шт}$. Технически обоснованная норма штучного времени определяется по формуле:

$$T_{шт} = t_o + t_e + t_{орг} + t_{мех} + t_{пер}, \quad (13.2)$$

где t_o – время основное (происходит непосредственное формообразование или обработка); t_e – время вспомогательное (закрепление, раскрепление, подвод и отвод инструмента и т.д.); $t_{орг}$ – время организационного обслуживания рабочего места (снабжение необходимыми предметами, удаление готовой продукции); $t_{мех}$ – время технического обслуживания рабочего места (подготовка к работе, прогрев и юстировка аппаратуры, выключение, уборка рабочего места и т.д.); $t_{пер}$ – время перерывов. Основное и вспомогательное время дают в сумме операционное время, $t_{орг}$ и $t_{мех}$ дают в сумме время обслуживания, которое, как правило, составляет около 20% операционного времени. Более точно значения $T_{шт}$ приводятся в справочной литературе по нормированию труда в соответствующих отраслях.

Для серийного производства характерной является переналадка оборудования и смена оснастки при переходе к изготовлению новой партии изделий. В этом случае к $T_{шт}$ добавляется время на подготовительно-заключительные действия $T_{пз}$ для партии в N экземпляров:

$$T_{шт.к} = T_{шт} + T_{пз} / N, \quad (13.3)$$

где $T_{шт.к}$ – время штучное калькуляционное.

Для повышения производительности труда и уменьшения трудоемкости операций следует проанализировать выражение:

$$T_{шт.к} = t_o + t_e + t_{орг} + t_{мех} + t_{пер} + T_{пз} / N. \quad (13.4)$$

Для идеального производства $T_{шт.к} \rightarrow t_o$, т.е. в таком производстве необходимо сводить к минимуму непроизводительные затраты времени.

Для уменьшения t_o применяют параллельную обработку. Например, многшпindelное сверление печатных плат, одновременное сверление не одной, а нескольких плат в пакете.

При пайке погружением печатных плат сразу все соединения подвер-

гаются пайке.

Для уменьшения t_g используют быстрозажимные устройства, многоместную обработку, когда в одном приспособлении закрепляются несколько заготовок, применяют механизированные приводы вместо ручных и др.

Чтобы уменьшить $t_{орг}$, следует использовать программируемые комплектовщики, обеспечивающие быстрое снабжение рабочих мест комплектовщиками изделиями, инструментом, заготовками.

Для уменьшения $t_{мех}$ оборудование должно быть надежным, обеспечивающим устойчивое сохранение установленных технологических режимов работы.

Время перерывов $t_{пер}$ устанавливается согласно санитарным нормам и нормам трудового законодательства и его произвольное уменьшение недопустимо.

Для уменьшения $T_{пз}$ используют станки с программным управлением, для которых достаточно поменять программы, чтобы начать производство следующей партии изделий.

Особенно перспективными являются гибкие производственные комплексы, состоящие из гибких производственных модулей, управление которыми проводится от централизованной АСУ ТП.

Когда существующий ТП уже не дает роста производительности труда, следует его изменять. В противном случае производство станет не конкурентоспособным, морально устаревшим. Как пример можно привести обработку отверстий в трудно обрабатываемых материалах. Обычными методами, со снятием стружки, это происходило за часы, обработка лазером занимает минуты. Контроль характеристик печатных узлов ручным способом занимает много времени, в то же время использование тестовой аппаратуры с полем контактов снижает время контрольных операций во много раз.

Можно резко повысить производительность производства и снизить трудоемкость выполнения операций, однако это может вызвать увеличение стоимости готовой продукции. Поэтому основным критерием является себестоимость выполнения технологической операции C_m :

$$C_m = Z_{тек} + Z_{ед} / N, \quad (13.5)$$

где $Z_{тек}$ – текущие (переменные) затраты, руб.; $Z_{ед}$ – единовременные (постоянные) затраты, руб.; N – программа выпуска изделий, шт.

$$Z_{тек} = C_M + C_3 + C_{нр}, \quad (13.6)$$

где C_M – затраты на материалы; C_3 – затраты на заработную плату основных рабочих; $C_{нр}$ – накладные расходы.

$$C_M = m q - m_o q_o, \quad (13.7)$$

где m – норма расхода материала на изделие; q – стоимость единицы материала; m_o – утилизированный остаток материала; q_o – стоимость единицы утилизованного остатка материала.

Заработная плата основных рабочих определяется исходя из норм штучного времени на операцию и тарифных ставок рабочего в единицу времени. Накладные расходы определяются из совокупности затрат на

обеспечение основного производственного процесса и могут сильно различаться для разных предприятий (от 50 до 300% от заработной платы основных рабочих).

Анализ себестоимости выпуска изделия проводится для выбора наиболее экономичного варианта ТП.

Для снижения технологической себестоимости необходимо уменьшать входящие в нее составляющие: применять рациональный раскрой и расход материалов, применять ресурсосберегающие технологии и т.п.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебн./ Под ред. В.А. Шахнова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.

2. Технология радиоэлектронных устройств и автоматизация производства: Учебн./ Под ред. А.П. Достанко. Минск: Вышейшая школа, 2002.

3. Новицкий Н.И. Организация производства на предприятиях. – М.: Финансы и статистика, 2003.

4. Мэнгин Ч.-Г., Макклеланд С. Технология поверхностного монтажа. М.: Мир, 1990.

5. Ханке Х.-И., Фабиан Х. Технология производства радиоэлектронной аппаратуры.-М.: Энергия, 1980.

6. "2000 Intel Packaging Databook" <http://www.intel.com>.

7. Mawer A. Plastic Ball Grid Array (PBGA) // Motorola Semiconductor Technical Data, Rev.2, AN1231/D, 11.04.1996.

8. Парфенов А. Технологические материалы для поверхностного монтажа // Электронные компоненты, №4 1999, с.31-33.

9. Медведев А. М. Монтажные флюсы. Смыть или не смывать// Компоненты и технологии, № 4, 2001. с. 96-100.

10. IPC-SM-782, "Surface Mount Design and Land Pattern Standard", IPC, August 1993, Amendment 1 October 1996, Amendment 2 April 1999 ISBN №1-580981-21-6.

11. Hwang J. Solder materials //Surface Mount Technology, March, 2003.

12. Григорьев В. Бессвинцовая технология – требование времени или прихоть законодателей от экологии? // Электронные компоненты, №6 2001, с.72-78.

13. Галецкий Ф. Особенности производства печатных плат в России // Электронные компоненты, №5 2001, с.18-26.

14. Dimensional Change Characteristics for Printed Circuit Board Films // Technical Data, Kodak Publication №TI-2530, March 2003.

15. Schmits J., Heiser G., Kukovski J. (Перевод Калмыкова А.) Взгляд в будущее. Технологические тенденции развития электронных компонентов и сборки электронных модулей на печатных платах // Компоненты и технологии, № 4, 2001, с.7-14.

16. Современный метод травления печатных плат / Порфирьев В., Петрова Э., Ракова А. // Электронные компоненты, №1, 2002, с.105-106.
17. Лисов В. Оборудование для тестирования печатных плат // Электронные компоненты, №5, 2001, с.70-75.
18. Лукин А., Парфенов А. Сравнительные коррозионные испытания узлов на поверхностном монтаже // Электронные компоненты, №5, 1999, с.61-63.
19. An Introduction to Surface Mounting // Data Sheet, RS Components, issued March 1997, 232-5569.
20. ГОСТ 10317-79 Платы печатные. Основные размеры. М.: Изд-во стандартов, 1984.
21. ГОСТ 23751-86 Платы печатные. Основные параметры конструкции. М.: Изд-во стандартов, 1986.
22. Back to Basics. A Step-by-Step Guide to Surface Mount Technology // Special supplement to SMT, July 1998.
23. The Building Blocks. A Step-by-Step Guide to Surface Mount Technology // Special supplement to SMT, July 2000.
24. The Building Blocks. A Step-by-Step Guide to Surface Mount Technology // Special supplement to SMT, July 2001.
25. Goukler B. Metal Stencil Overview // Surface Mount Technology, April, 2001.
26. Heininger N. Polymer Stencils for Wafer Bumping // Surface Mount Technology, June, 2001.
27. Stevenson J., Drabenstadt D. Stencil Printer Optimization Study // Surface Mount Technology, November, 1999.
28. Kirkpatrick R. Two-dimensional, Closed-loop Inspection of Stencil Printing // Surface Mount Technology, July, 1999.
29. Kane R. Tuning Out "Thermal Noise" for Reliable AOI Inspection // EP&P, №12, 2002.
30. Eskridge T. Test & Inspection // Surface Mount Technology, October, 2000.
31. Fishburn J. Advances in Lead-free Soldering and Automatic Inspection // Surface Mount Technology, November, 2002.
32. Oresjo S., Odbert B. Charting a DFT Course for Limited-access Boards // Surface Mount Technology, June, 2002.

Содержание

Введение	3
1. Комплекс работ по созданию новой техники	4
1.1. Организация НИР	6
1.2. Организация ОКР	8
1.3. Роль патентной и научно-технической информации в процессе создания новой техники	10
2. Этапы разработки РЭА	12

2.1. Техническая документация	13
2.2. ЕСКД	13
2.3. ЕСТД	15
3. Принципы конструирования радиоэлектронных устройств	18
3.1. Технологичность конструкций узлов РЭА	21
3.2. Конструкция РЭА и условия эксплуатации	22
4. Изготовление деталей. Методы обработки и формообразования материалов	24
4.1. Обработка резанием	24
4.2. Изготовление деталей методом литья	26
4.3. Изготовление деталей холодной штамповкой	28
4.4. Электрофизические и электрохимические методы обработки деталей	28
5. Комплектующие детали. Компоненты для установки на ПП	30
5.1. Пассивные компоненты для поверхностного монтажа	32
5.2. Интегральные компоненты	35
5.3. Нестандартные компоненты	41
5.4. Выводные компоненты	43
6. Печатные платы	44
6.1. Конструирование ПП	45
6.2. Классы точности ПП	48
6.3. Размеры ПП	49
6.4. Маркировка на ПП	50
6.5. Проектирование рисунка проводников ПП и паяемость	51
6.6. Проектирование ПП с учетом тест-контроля	55
6.7. Технология получения рисунка проводников на ПП	56
6.8. Покрывтия и маски для наружных слоев ПП	62
6.9. Фотошаблоны для ПП	64
6.10. Процессы металлизации в производстве ПП	66
6.11. Активация поверхностей диэлектриков	70
6.12. Гальваническая металлизация	72
6.13. Травление в производстве ПП	75
7. Пайка	79
7.1. Пайка волной припоя	83
7.2. Пайка в парогазовой фазе (ПГФ)	85
7.3. Пайка инфракрасным нагревом (ИК-пайка)	86
7.4. Конвекционная пайка	87
7.5. Другие методы пайки	88
8. Припойная паста	90
8.1. Технология нанесения припойной пасты	93
8.2. Технологии изготовления трафаретов	95
8.3. Параметры процесса трафаретной печати	99
8.4. Очистка плат после пайки	100

9. Установка компонентов на ПП	101
9.1. Способы позиционирования	104
9.2. Системы подачи компонентов	106
9.3. Производительность оборудования	107
9.4. Перспективы сборочно-монтажных производств с применением компонентов для поверхностного монтажа	108
10. Операционный и другие виды контроля в сборочном производстве	110
11. Ремонт узлов с поверхностным монтажом	116
12. Испытания узлов	117
13. Организация производства на предприятии	122
13.1. Производственный процесс	123
13.2. Основные принципы организации производственных процессов	126
13.3. Продолжительность и структура производственного цикла изготовления изделия	129
13.4. Примерная структура предприятия	132
13.5. Формы специализаций основных цехов предприятия	135
13.6. Производственная структура основных цехов предприятия	137
13.7 Классификация затрат рабочего времени. Технически обоснованные нормы	139
Список рекомендуемой литературы	141