

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование)

15.03.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Технологии сварочного производства и инженерия поверхностей

(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Инфракрасная пайка как метод монтажа электронных радиоэлементов

Обучающийся

И.Г. Ванджиев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент А.Ю. Краснопевцев

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультанты

к.ф.-м.н., доцент Д.А. Романов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

А.Н. Кирюшкина

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

В бакалаврской работе рассматривается задача выбора оптимальной технологии пайки радиоэлектронных компонентов с целью снижения производственных затрат. Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения экономической эффективности процессов поверхностного и сквозного монтажа на фоне растущих требований к качеству, автоматизации и ресурсоэффективности.

В процессе исследования выполнен сравнительный анализ пяти наиболее распространённых технологий пайки: пайка паяльником, пайка волной припоя, конденсационная пайка, инфракрасная пайка и лазерная пайка. Проанализированы их технико-экономические показатели, особенности реализации, пригодность для применения в условиях мелко- и среднесерийного производства, а также степень автоматизации и совместимость с современными типами компонентов.

В результате анализа обоснован выбор инфракрасной пайки как наиболее сбалансированной технологии по критериям затрат, надёжности, универсальности и экологичности. Разработан пооперационный технологический процесс пайки, подобраны необходимые режимы нагрева, материалы и оборудование. Также оценены показатели безопасности, энергоэффективности и потенциальной экономии по сравнению с альтернативными методами.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанного решения для модернизации существующих производственных линий и снижения себестоимости продукции на предприятиях радиоэлектронной отрасли.

Abstract

This bachelor's thesis addresses the task of selecting the optimal soldering technology for electronic components with the primary goal of reducing production costs. The relevance of the topic stems from the need to enhance the economic efficiency of surface-mount and through-hole assembly processes amid increasing demands for quality, automation, and resource optimization.

The study presents a comparative analysis of five widely used soldering methods: manual soldering, wave soldering, vapor phase soldering, infrared (IR) soldering, and laser soldering. Their technical and economic characteristics, implementation features, suitability for small- and medium-scale production, level of automation, and compatibility with modern components are thoroughly evaluated.

Based on the analysis, infrared soldering is identified as the most balanced technology in terms of cost-efficiency, reliability, versatility, and environmental friendliness. A step-by-step soldering process has been developed, including the selection of temperature profiles, materials, and equipment. In addition, safety aspects, energy efficiency, and the potential for cost reduction compared to alternative methods are considered.

The practical value of this work lies in the applicability of the proposed solution for modernizing existing production lines and reducing product cost in electronics manufacturing.

Содержание

Введение.....	6
1 Анализ исходных данных и известных решений по пайке радиоэлементов ..	7
1.1 Описание конструкций печатных плат	7
1.2 Известные варианты технологий монтажа электронных компонентов ..	9
1.3 Сравнительный анализ методов пайки	11
1.4 Задачи бакалаврской работы.....	15
2 Разработка технологического процесса инфракрасной пайки радиоэлементов	16
2.1 Особенности и основные операции ИК пайки.....	16
2.2 Сборка.....	19
2.3 Пайка	28
2.4 Очистка плат после пайки и контроль печатных плат	35
2.5 Выбор припойной пасты	41
2.6 Технологическое оснащение для пайки ИК-излучением.....	42
3 Безопасность и экологичность при реализации технологического процесса инфракрасной пайки	51
3.1 Общие требования к обеспечению безопасности технологического процесса.....	51
3.2 Средства индивидуальной и коллективной защиты.....	52
3.3 Вентиляция и контроль микроклимата	53
3.4 Оценка экологической безопасности процесса пайки	53
3.5 Пожарная безопасность и обращение с опасными веществами	54
3.6 Организация производственного контроля и обучение персонала	55
4 Оценка экономической эффективности применения инфракрасной пайки	57
4.1 Исходные данные для экономических расчетов.....	57
4.2 Расчёт затрат на оборудование и материалы	58
4.3 Сравнительный анализ себестоимости с другими методами пайки	59
4.4 Оценка капитальных вложений и окупаемости	59
4.5 Расчёт показателей экономической эффективности	60
4.6 Применимость инфракрасной пайки для крупносерийного производство.....	64

4.7 Вывод по оценке экономической эффективности дипломной работы .	60
Заключение.....	67
Список используемой литературы и используемых источников.....	69

Введение

«Современная радиоэлектронная промышленность предъявляет всё более жёсткие требования к снижению себестоимости продукции при сохранении высокого качества монтажа. Особенно актуальной становится задача оптимизации технологических процессов на этапах сборки и пайки электронных компонентов. Пайка, как основной метод формирования электрических и механических соединений между элементами и печатной платой, оказывает непосредственное влияние не только на надёжность устройства, но и на затраты, связанные с производством, обслуживанием и эксплуатацией оборудования» [2], [6].

«В настоящее время на практике используются следующие основные технологии пайки: пайка паяльником, пайка волной припоя, конденсационная пайка, инфракрасная пайка и лазерная пайка. Каждая из них имеет определённые технические и экономические характеристики» [23].

Целью данной бакалаврской работы является выбор технологии пайки радиоэлектронных компонентов, обеспечивающей наименьшие затраты при сохранении необходимого уровня качества, надёжности и совместимости с современными конструкциями печатных плат. Для достижения этой цели проводится всесторонний анализ существующих методов пайки, сравнение их технических и экономических характеристик, выбор оптимальной технологии, разработка технологической схемы пайки и оценка эффективности её внедрения.

1 Анализ исходных данных и известных решений по пайке радиоэлементов

1.1 Описание конструкций печатных плат

«Печатная плата является основным конструктивным элементом электронных устройств, обеспечивающим электрическое соединение и механическую фиксацию компонентов. Она представляет собой диэлектрическое основание с нанесёнными проводящими дорожками, контактными площадками и монтажными отверстиями. Использование печатных плат предельно широко – практически 100% современных электронных устройств включает в свою конструкцию одну или даже несколько ПП – от крупной бытовой техники до мобильной электроники и спецоборудования» [17]. По количеству слоев ПП подразделяются на односторонние, двусторонние и многослойные (рисунок 1).

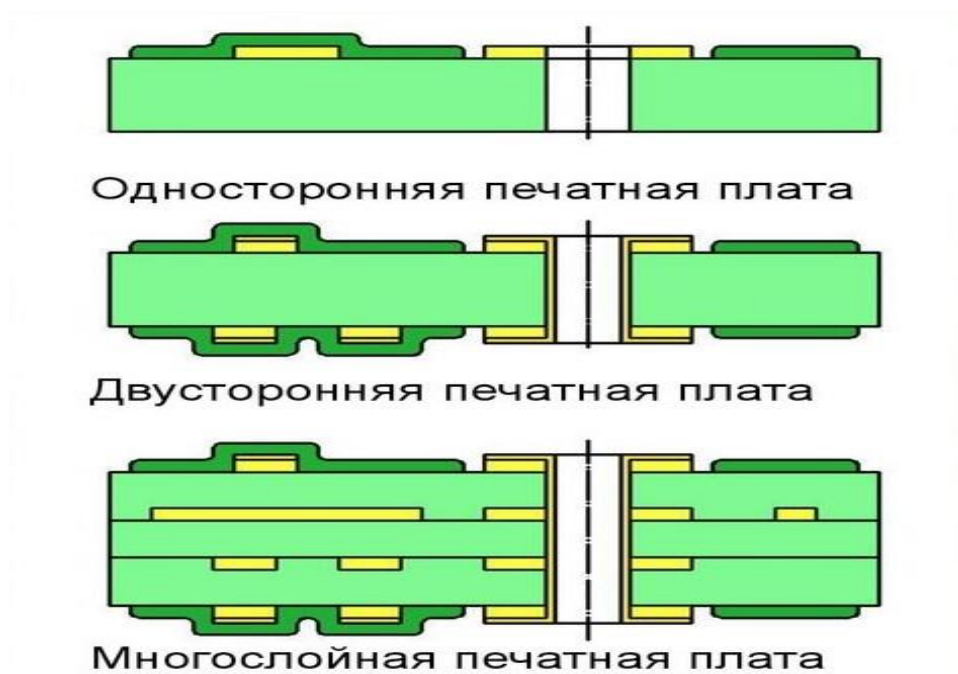


Рисунок 1 - виды печатных плат

Односторонняя печатная плата.

Достоинством такой конструкции печатных плат является простота и низкая стоимость изготовления. «Недостатком является невозможность применения функционально сложных электронных компонентов ввиду низкой разрешающей способности печатных проводников. Ширина печатных проводников и соответственно расстояние между ними составляет около 1 мм и более, что соответствует первому классу точности в соответствии с ГОСТ Р 53429-2009» [17]. Кроме того, такую плату сложно реализовать с точки зрения «обеспечения целостности сигнала, так как печатные проводники расположены на одной стороне, а также отсутствуют потенциальные слои, которые выполняют функцию экранировки. Более того, для реализации таких печатных плат используют в качестве материала гетинакс, что говорит об ограниченной области применения таких плат» [1].

Двусторонняя печатная плата.

«В зависимости от материала основания печатной платы различают двусторонние печатные платы на жестком или гибком основании. В отличие от односторонних печатных плат, двусторонние печатные платы находят более широкое распространение, так как путем применения данной конструкции удастся решить вопросы, связанные с разрешающей способностью печатного проводника и целостностью сигнала. Как правило, такие платы соответствуют 3 классу точности (минимальная ширина проводника 0,25 мм). Кроме того, можно реализовать конструкцию двусторонней печатной платы по 5 классу точности (минимальная ширина проводника 0,1 мм)» [19].

Многослойная печатная плата

В зависимости от материала основания печатной платы различают многослойные печатные платы на жестком, гибко-жестком или гибком основании. Данная конструкция печатных плат «наиболее распространенная. Такая конструкции позволяет решить вопросы не только с целостностью сигнала, за счет применения сигнально-потенциальных звеньев (слои земли и

питания, как правило внутренние), но и позволяют увеличить плотность монтажа, за счет увеличения количества слоев, применения глухих и слепых отверстий, функционально сложных электронных компонентов, таких как BGA (электронные компоненты, выводы которых расположены под корпусом в виде матрицы шариковых выводов). Кроме того, многослойная структура позволяет применять оригинальные решения по увеличению плотности монтажа: применение технологии встраивания как активных (бескорпусных), так и пассивных компонентов внутри ядра печатной платы» [24]. В настоящее время существуют технологии, способные реализовать многослойную структуру по 6 или даже по 7 классу точности - минимальная ширина проводника 0,050 мм.

«Как правило выбор конструкции определяет разработчик принципиальной электрической схемы, указывая в техническом задании конструктору печатных плат об особенностях реализации конкретных цепей на плате» [22].

1.2 Известные варианты технологий монтажа электронных компонентов

«Монтаж электронных компонентов является ключевым этапом в производстве радиоэлектронной аппаратуры. От выбора конкретной технологии монтажа зависит не только надежность и эксплуатационные характеристики конечного изделия, но и его себестоимость, технологичность, возможность автоматизации процесса» [6]. На сегодняшний день наибольшее распространение получили три основные группы технологий: сквозной монтаж (ТНТ), поверхностный монтаж (SMT) и гибридный монтаж, а также более специализированные методы, такие как Chip-on-Board (COB) и Flip-Chip

Сквозной монтаж (ТНТ, Through-Hole Technology) представляет собой традиционный метод установки компонентов на печатную плату. «Компоненты имеют длинные выводы, которые вставляются в заранее

подготовленные отверстия на плате и припаиваются с обратной стороны. Основными преимуществами данного метода являются высокая механическая прочность соединения и устойчивость к вибрациям, что делает его незаменимым в условиях жесткой эксплуатации, например, в промышленной или военной электронике» [24]. Однако сквозной монтаж значительно ограничивает плотность размещения компонентов, требует больших габаритов печатных плат и плохо поддается автоматизации, что делает его неэффективным в условиях массового производства.

«Поверхностный монтаж (SMT, Surface-Mount Technology) стал доминирующей технологией в современной электронике. В отличие от ТНТ, компоненты в SMT не требуют отверстий в плате - в печах оплавления, использующих различные методы нагрева (инфракрасный, конвекционный или парогазовый). Преимуществами SMT являются высокая плотность монтажа, снижение массы и размеров устройств, улучшение электрических характеристик, возможность полной автоматизации процесса и уменьшение затрат на производство. Поверхностный монтаж широко используется в потребительской, автомобильной, медицинской и телекоммуникационной электронике. Недостатком SMT считается усложнение ручного ремонта и необходимость точного оборудования для установки компонентов» [21].

В ряде случаев применяется гибридный монтаж, сочетающий в себе элементы как сквозного, так и поверхностного монтажа. «Такая технология используется, когда на одной плате одновременно присутствуют миниатюрные микросхемы, удобные для SMT, и крупные элементы (например, трансформаторы, конденсаторы, разъемы), для которых предпочтителен ТНТ. Гибридный монтаж позволяет достичь универсальности и надежности, однако требует более сложной организации производственного процесса и совмещения различных методов пайки» [1].

«В дополнение к этим трем базовым подходам в современной электронике используются также специализированные методы монтажа. Технология Chip-on-Board (COB) предусматривает установку

полупроводникового кристалла непосредственно на печатную плату с последующим подключением к ней с помощью тонких проводников и заливкой компаундом. Такой метод позволяет минимизировать размеры и снизить стоимость изделий при массовом производстве, но затрудняет ремонт и требует строго контролируемых условий» [24].

Ещё одним высокотехнологичным методом является Flip-Chip — монтаж перевёрнутого кристалла контактами вниз. Соединение с платой осуществляется при помощи шариков припоя, аналогично корпусам типа BGA. Flip-Chip обладает высокой плотностью, минимальными паразитными параметрами и отличными ВЧ-характеристиками, но требует очень точного оборудования и контроля температуры.

Таким образом, «выбор технологии монтажа электронных компонентов определяется целевым назначением устройства, требованиями к его надёжности, условиями эксплуатации, объёмами производства и бюджетом проекта. В условиях серийного производства, ориентированного на снижение себестоимости и автоматизацию, оптимальной является технология поверхностного монтажа. В контексте настоящей бакалаврской работы, где исследуется инфракрасная пайка, именно SMT выступает базовой основой для анализа и проектирования технологического процесса, данная технология наиболее эффективно сочетается с возможностями ИК-нагрева» [18].

1.3 Сравнительный анализ методов пайки

«На современном этапе развития электронной промышленности существует широкий спектр технологий пайки, каждая из которых имеет свои особенности, область применения, преимущества и ограничения. К основным технологиям относятся: пайка паяльником, пайка волной припоя, конденсационная пайка, инфракрасная пайка и лазерная пайка. Их выбор

зависит от типа монтажа, объема производства, требований к надежности и доступности оборудования» [7].

«Пайка паяльником является самой простой и традиционной технологией, применяемой в основном в условиях мелкосерийного производства, лабораториях и при ремонте оборудования. Для её реализации используется электрический паяльник с регулируемой температурой и припой. Главным достоинством пайки паяльником является её доступность и гибкость. Однако, эта технология обладает рядом существенных недостатков: низкая производительность, отсутствие повторяемости, зависимость качества соединений от квалификации оператора и высокая вероятность появления дефектов, таких как холодная пайка, перегрев или замыкания» [1].

«Пайка волной припоя представляет собой автоматизированный процесс, в котором печатная плата проходит над волной расплавленного припоя. Этот метод широко используется для пайки компонентов с выводами в отверстиях (ТНТ), особенно при массовом производстве. Он обеспечивает хорошую производительность, высокую надежность соединений и минимальные трудозатраты. Однако, он практически не применяется для компонентов поверхностного монтажа (SMT), требует сложного и дорогостоящего оборудования, а также сопровождается значительным расходом припоя и высоким энергопотреблением» [7].

Конденсационная пайка

«Данная технология подходит для мелкосерийного производства печатных плат и позволяет осуществлять монтаж SMD компонентов любого типа, не боясь перегрева» [22].

«Нагрев платы с электронными компонентами, предварительно установленными на паяльную пасту, осуществляется за счет конденсации пара в камере автоматизированной установки. Источник пара – химически инертная жидкость, не провоцирующая возникновения коррозии. Выбор жидкости с подходящей температурой кипения (от 160°C до 260°C) зависит от

индивидуальных требований к условиям пайки и типа припоя (свинцовосодержащий или бессвинцовый)» [1].

«Пар кипящей жидкости вытесняет воздух из камеры, поэтому пайка осуществляется в бескислородной среде. Так как температура пара стабильна, исключен перегрев компонентов и обеспечивается безупречная повторяемость процесса. Данный вид пайки печатных плат позволяет создавать изделия любой сложности, включая гибкие платы, многослойные, на алюминиевом основании» [24].

Инфракрасная пайка реализует передачу тепловой энергии посредством инфракрасного излучения, которое поглощается элементами платы и преобразуется в тепло. «Нагрев осуществляется равномерно по всему объёму платы, включая внутренние слои, что особенно важно при работе с многослойными РСВ и корпусами BGA, QFN и подобными. К основным преимуществам инфракрасной пайки относят: отсутствие механического воздействия, высокую равномерность нагрева, точный контроль температурного профиля, энергоэффективность, возможность автоматизации, а также совместимость с бессвинцовыми припоями. Недостатками являются чувствительность к отражающим поверхностям (например, металлические корпуса) и необходимость экранирования чувствительных компонентов. Несмотря на это, инфракрасная пайка успешно применяется в серийном производстве и демонстрирует высокую повторяемость результатов» [24].

«В отличие от конденсационных печей, инфракрасные системы обеспечивают более длительный прогрев печатных плат, что позволяет уменьшить тепловые потери в процессе пайки и поддерживать достигнутый термический баланс за счет ускоренного остывания. В этой системе возможно достижение высоких пиковых температур с минимальным ухудшением общей тепловой нагрузки на плату» [18].

Лазерная пайка является высокоточной технологией, использующей фокусированный луч для локального нагрева участков платы. «Данный метод обеспечивает быстрый, контролируемый и очень точный нагрев, что делает

его особенно эффективным для пайки миниатюрных компонентов и в условиях плотного монтажа. Однако стоимость лазерных установок и сложность их эксплуатации существенно ограничивают распространение данной технологии, особенно в среднесерийном производстве» [7].

Сравнительный анализ различных методов пайки представлен в таблице 1.

Таблица 1 – «Сравнительный анализ различных методов пайки» [7]

Показатель	Пайка паяльником	Волновая пайка	Конденсационная пайка	Инфракрасная пайка	Лазерная пайка
Автоматизация процесса	Низкая	Высокая	Средняя	Средняя/высокая	Высокая
Серийность применения	Мелкосерийный, ремонт	Крупносерийное	Среднесерийное	Любое	Микросерийное, спецпроекты
Подходит для SMT	Ограниченно	Нет	Да	Да	Да
Повторяемость результата	Низкая	Высокая	Высокая	Высокая	Очень высокая
Необходимость специального оборудования	Минимальная	Да	Да	Да	Да
Влияние оператора	Очень высокое	Низкое	Среднее	Низкое	Очень низкое
Возможность повреждения компонентов	Высокая	Средняя	Низкая	Низкая	Очень низкая
Стоимость оборудования	Низкая	Высокая	Очень высокая	Средняя	Очень высокая
Энергоэффективность	Средняя	Низкая	Средняя	Высокая	Средняя
Влияние массы/цвета компонентов	Высокое	Высокое	Незначительное	Среднее	Незначительное
Температура пайки (типовая)	300–400 °C	250–270 °C	От 160°C до 260°C	230–250 °C	>250 °C
Скорость пайки	Низкая	Высокая	Средняя	Средняя	Очень высокая
Экологичность	Средняя	Средняя	Низкая	Высокая	Высокая
Уровень технического обслуживания	Низкий	Средний	Высокий	Низкий	Высокий
Основная область применения	Ремонт, прототипы	ТНТ-компоненты	Прецизионная пайка	SMT, BGA, QFN	Микроэлектроника, медицина

В рамках данной бакалаврской работы для проектирования технологического процесса пайки выбран инфракрасный метод, как наиболее сбалансированный по показателям эффективности, безопасности, адаптивности к различным конструкциям плат и типам компонентов, а также по уровню затрат.

1.4 Задачи бакалаврской работы

На основании анализа конструкций печатных плат, известных технологий монтажа и различных методов пайки электронных компонентов сформулированы основные задачи, решаемые в рамках данной бакалаврской работы:

1. Разработать проектный технологический процесс пайки с использованием инфракрасной технологии для различных вариантов (ремонт или изготовление, требуемая программа), включая выбор содержания операций, необходимого оборудования, материалов и последовательности операций.
2. Оценить безопасность, экологичность и энергетическую эффективность выбранного технологического процесса.
3. Выполнить экономическое сравнение базового и проектного вариантов, определить ожидаемую экономию и возможный социальный эффект внедрения инфракрасной пайки на производстве.

Выполнение данных задач позволит обоснованно выбрать оптимальную технологию пайки.

2 Разработка технологического процесса инфракрасной пайки радиоэлементов

2.1 Особенности и основные операции ИК пайки

«Инфракрасная пайка (ИК пайка) представляет собой бесконтактный метод соединения радиоэлементов, при котором нагрев осуществляется посредством инфракрасного излучения. Этот способ обеспечивает равномерное распределение тепла по всей поверхности печатной платы, исключая прямой контакт нагревательных элементов с компонентами, что снижает вероятность механических повреждений и обеспечивает высокое качество пайки. Метод особенно эффективен при работе с компонентами поверхностного монтажа (SMT), в том числе с микросхемами в корпусах BGA, QFN, LGA, а также при необходимости пайки многослойных плат и плотном монтаже» [7].

«ИК пайка основывается на использовании инфракрасных ламп (кварцевых или керамических), излучающих тепловую энергию в диапазоне длин волн от 0,8 до 3,5 микрон. Поглощение энергии материалами компонентов зависит от их отражательной способности, цвета и теплопроводности, поэтому важное значение имеет точная настройка температуры и времени каждого этапа пайки» [1].

Подготовка поверхности перед пайкой

Правильная подготовка контактных площадок и выводов компонентов является критически важным этапом, определяющим надёжность будущего соединения. Основные операции включают:

- Механическая и химическая очистка поверхности: удаление пыли, масляных загрязнений, окислов меди и остатков предыдущего флюса с применением изопропилового спирта, спирто-бензиновых смесей или специализированных промывочных составов.

- Удаление старого припоя: в процессе ремонта важно полностью удалить остатки предыдущей пайки. Используются медные оплётки или вакуумные отсосы. Поверхность дополнительно обрабатывается флюсом и очищается повторно.

- Сушка печатной платы: платы, хранившиеся при высокой влажности, необходимо подвергнуть термостабилизации (например, 100 °C в течение 2–3 часов), чтобы избежать образования паровых пузырей и деламации при пайке.

- Проверка контактных площадок: осуществляется визуальный и микроскопический контроль. При обнаружении повреждённых дорожек или пятаков выполняется их восстановление методом локального ремонта.

- Нанесение паяльной пасты: осуществляется с использованием трафарета или дозатора. Паста должна равномерно покрывать контактные площадки без избыточного объёма, что важно для формирования надежных соединений.

Основные этапы нагрева при ИК пайке

Инфракрасная пайка проходит поэтапно, с соблюдением температурного профиля, который адаптируется под конкретный тип компонентов и состав припоя.

Например, предварительный подогрев (1):

- Температура: 120–150 °C

- Время: 60–90 секунд

Назначение: снижение температурного градиента между компонентами, удаление остаточной влаги, плавный переход к следующей фазе.

2. Равномерный прогрев (Soak)

- Температура: 150–180 °C

- Время: 60–120 секунд

- Назначение: активация флюса, равномерное прогревание всех слоёв платы, снижение термонапряжений.

3. Пиковый нагрев (Reflow)

- Температура: 230–250 °C (в зависимости от состава припоя)
- Время: 20–40 секунд
- Назначение: расплавление припоя и формирование межсоединений между выводами компонентов и площадками

Правильное соблюдение профиля пайки позволяет добиться высокого качества и повторяемости результата, особенно при использовании бессвинцовых припоев типа SAC305.

Ремонт и повторная пайка (распайка)

ИК технология позволяет не только производить первичную установку компонентов, но и эффективно выполнять ремонт и замену элементов на печатной плате.

- Распайка компонентов: осуществляется посредством локального нагрева участка платы до температуры плавления припоя с помощью ИК-излучения. Для BGA и подобных корпусов применяется центрирование и съём с помощью вакуумной головки.

- Очистка площадок: после снятия компонента удаляются остатки припоя, флюса и загрязнений. Используется пайка оплёткой, флюсы, спиртосодержащие растворы.

- Ремонт повреждений: при необходимости производится восстановление контактных площадок, дорожек, маски и слоёв основания платы.

- Установка нового компонента: после нанесения паяльной пасты и позиционирования элемента осуществляется повторная пайка с соблюдением температурного профиля. Температурные режимы инфракрасной пайки приведены в таблица 2.

Таблица 2 – «Температурные режимы ИК пайки» [4]

Этап пайки	Температура (°C)	Время
Предварительный нагрев	120–150	60–90 сек
Равномерный прогрев	150–180	60–120 сек
Пиковый нагрев	230–250	20–40 сек
20–40 сек Охлаждение	<150	Постепенно

Преимущества и особенности ИК пайки

- Высокая равномерность прогрева: исключает термошоки, снижает дефекты пайки
- Бесконтактный метод: снижает вероятность механических повреждений
- Автоматизация и программное управление: обеспечивает стабильность и повторяемость процесса
- Совместимость с бессвинцовыми технологиями: отвечает требованиям RoHS и экологической безопасности
- Подходит для сложных и миниатюрных компонентов: в том числе с нижними выводами

ИК пайка является универсальной и эффективной технологией, применимой как в массовом производстве, так и при мелкосерийном выпуске и ремонте радиоэлектронных устройств.

2.2 Сборка

«Для крепления элементов на задней поверхности печатных плат часто применяют клей, который полимеризуется под действием лучей ультрафиолетового или инфракрасного излучения: предпочтение отдается

УФ-технологиям. После высыхания на поверхность платы укладываются компоненты и происходит спайка под инфракрасным паяльным аппаратом. Эта технология обеспечивает прочное соединение интегральных схем и микросхем и широко применяется в производственных процессах и научных исследованиях» [17].

«Для качественного выполнения процессов пайки компонентов устройств электронного назначения применяются флюсы, которые используются при нагреве плат до максимального уровня 300°C. Это обеспечивает необходимый диапазон температур для плавления и уменьшает вероятность расслоения печатных плат, а также расширяет технологическое окно при пайке компонентов электронного назначения. Сокращение времени оплавления до 90 секунд позволяет также снизить расход флюсов, что приводит к уменьшению себестоимости процесса. При этом печатная плата защищена от окисления. Выбор флюса обусловлен необходимостью достигнуть требуемого процента заполнения области изделий с минимальным уровнем ионного загрязнения, а уровень гидрирования при пайке позволяет значительно улучшить параметры флюсов, которые повышают качественное и количественное содержание смачиваемых полимеров, как при нормальных условиях, так и при повышенной влажности» [7].

«При сборке перед механизированной пайкой необходимо не только обеспечить заданное положение соединяемых элементов, но также нанести флюс и припой. Флюс, содержащийся в паяльной пасте, играет центральную роль в процессе пайки и выполняет множество функций. Первым и основным свойством флюса является очистка поверхностей соединяемых деталей от окислов и других загрязнений» [20]. Это обеспечивает высококачественное соединение, так как прочность пайки зависит от степени чистоты соединяемых деталей. «Однако важно не только удаление загрязнений, но и поддержание стабильной реологии паяльной пасты, поскольку ее рабочие характеристики напрямую влияют на процесс нанесения пасты на печатную плату. Худшая текучесть пасты приведет к образованию дефектов – зазубрин, брызг и

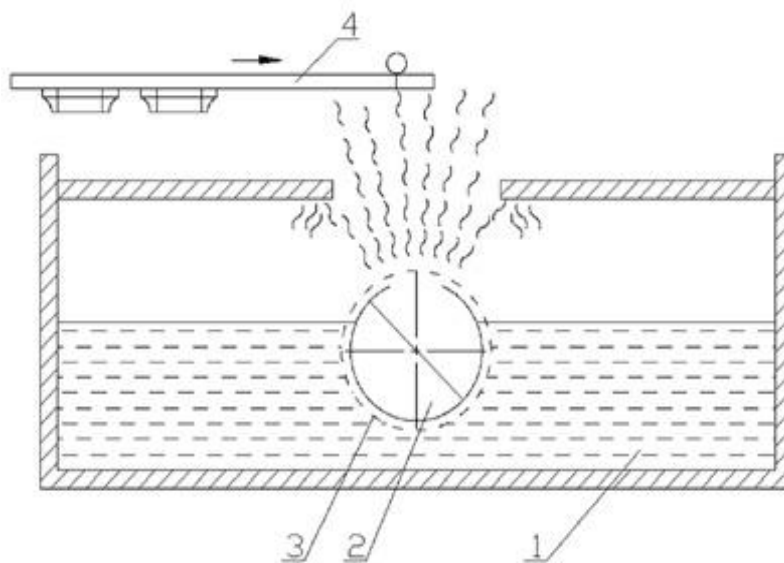
недостатка пасты в критически необходимых областях» [10]. Существуют различные подходы к контролю реологического поведения паяльной пасты, включая увеличение доли твердых компонентов, введение загустителей и модификацию состава флюса. Главное – найти оптимальный баланс, чтобы не ухудшить качество пайки из-за слишком вязкой пасты или, наоборот, не вызвать забивание дозирующих сопел.

«Итак, состав флюса – канифоль, активаторы, кислотные компоненты и защитные добавки – должен быть подобран в зависимости от условий пайки. Например, для обеспечения надежных соединений при пайке сложных открытых и закрытых конструкций канифоль дополнительно насыщают растворимыми кислотами и антикоррозийными компонентами. Водосмываемые флюсы, содержащие активные остатки, обеспечивают хорошую прочность соединения, однако оставляют коррозионно-активные следы, что требует особого внимания к тому, где и как их использовать. Важно правильно выбирать тип флюса для различных условий пайки, чтобы обеспечить высококачественное соединение и избежать проблем, возникающих из-за неподходящего дозирования флюса» [14].

«Распределение флюса на печатной плате осуществляется посредством его распыления, что позволяет добиться равномерного осаждения вещества и оптимизировать его расход. Правильное распределение флюса препятствует образованию капель на поверхности плат. Проблема каплеобразования возникает в результате несоответствия давления распыла необходимым значениям. Низкое давление распылителя формирует большие и неустойчивые капли, а чрезмерно высокое приводит к отрыву флюса от поверхности, что негативно сказывается на качественных характеристиках флюсования и приводит к перерасходу флюса, загрязнению оборудования. Поэтому контроль за флюсованием – важнейшая часть технологического процесса, так как неправильное распределение флюса вызывает дальнейшие проблемы. Регулировка скорости конвейера, подач флюса и конфигурации распылителя должны проводиться, как правило, периодически. Необходимо

следить за давлением, а при выявлении дефектов на слое флюса – повторный распыл на зону дефекта при повышении давления» [6].

«По результатам исследований установлено, что применение высоконапорных флюсов позволяет увеличить распылительные характеристики на 10-20% по сравнению с традиционно используемыми спиртовыми флюсами» [20]. Флюсование высоконапорными флюсами производится на решетчатом барабане (рисунок 2).



1 – жидкий флюс; 2 – сжатый воздух; 3 – сетчатый барабан; 4 – печатная плата

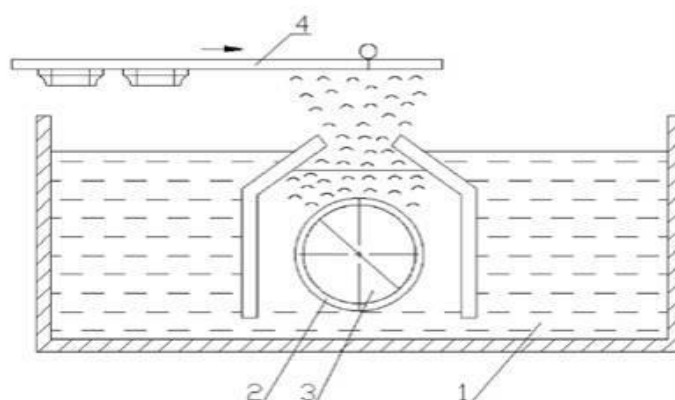
Рисунок 2 – Процесс флюсования при посредстве вращающегося сетчатого барабана

«Жидкий флюс распыляется сжатым воздухом, проходя через пористую стенку барабана в виде мельчайших капель» [1]. Основные факторы, влияющие на каплеобразование флюса: скорость движения конвейерной ленты; скорость вращения барабана; давление сжатого воздуха; вязкость флюса.

«Фильтры пенного типа, предназначенные для осуществления операций по флюсованию, функционируют благодаря использованию высокоэффективной мелкопузырьковой пены, которая идеально подходит для

процессов металлизации. Данные устройства отличаются высокой надежностью и низкой чувствительностью к засорению; даже в условиях повреждения одного из составных элементов системы работа оборудования не прекращается» [7].

Теперь рассмотрим порядок применения пенного флюсования. На первом этапе подбирается необходимый уровень рабочего флюсующего вещества в флюсаторе. Далее плавно увеличивается давление флюса до заданного конструктивного значения. В соответствии с рекомендациями высота образуемой пены должна быть порядка 20 мм. Единым условием, позволяющим изменить данное значение, является предотвращение загрязнения верхней стороны печатной платы флюсом. Аппаратура для флюсования пеной (рисунок 3).



1 – жидкий флюс; 2 – сжатый газ; 3 – подогреватель; 4 – платформа для печатной платы

Рисунок 3 – Аппаратура для флюсования пеной

«Флюс подается в два этапа. На первом этапе пена в передвижении по фланцу переходит в нижнее позиционирование плат. Обработку проводят с нижней (лицевой) стороны плат, проникая флюсом по вентиляционным отверстиям. Для подачи пены необходимо обеспечить определенные параметры: обеспечить размеры воздушных пузырей (оптимальные 1-2 мм,

что достигается абсолютно открытой аэрационной трубкой и равномерностью пузырьков), высоту образования слоя пены (от 0 до 15 мм). Аэратор должен быть устроен таким образом, чтобы обеспечить его легкую замену. При выходе устройства из строя, флюсование прекращается немедленно» [14].

«В настоящее время наиболее распространенным вариантом сборки является предварительное нанесение на места соединения пасты, включающей припой, и флюс, а также обеспечивающую прилипание (адгезию) устанавливаемых на слой пасты электронных компонентов» [7]. Для нанесения пасты используется так называемая трафаретная печать. Отверстия в трафарете крайне точно подведены под контактные площадки печатной платы. Паста, изготовленная из правильно подобранного набора компонентов с необходимым флюсом, равномерно распределяется по трафарету. «Для изготовления трафаретов используют никелевые сплавы или нержавеющую сталь, а отверстия вырезают химическим травлением или лазерной резкой» [17]. Замена трафарета при пересмене типа печатной платы снижает общую гибкость процесса. Способ, безусловно, нужно автоматизировать. Процесса печати пасты (рисунок 4).



Рисунок 4 – Процесс печати пасты

«При сборке печатных плат применяется скребковый метод. Он является самым распространенным среди производителей. В процессе скребкового метода паяльная паста уплотняется и проталкивается через трафарет; результатом является заполнение образующихся в плате отверстий. Эффективность этого метода зависит от четкой настройки следующих параметров: угол и скорость движения скребка, а также сила нажатия. Также важно следить за чистотой используемых инструментов – трафарета и скребка, а также за соблюдением условий хранения паяльной пасты. Если слишком длительное или неправильное предварительное отверждение пластиковых свинцов может негативно отразиться на итоговом результате (в том числе привести к полному отсутствию соединения), то, как показывают исследования, в основном ошибки возникают из-за неприемлемых характеристик паяльной пасты. Используя трафаретный метод, можно добиться нужной толщины 0,65 мм, (рисунок 5) и высокой точности» [10].

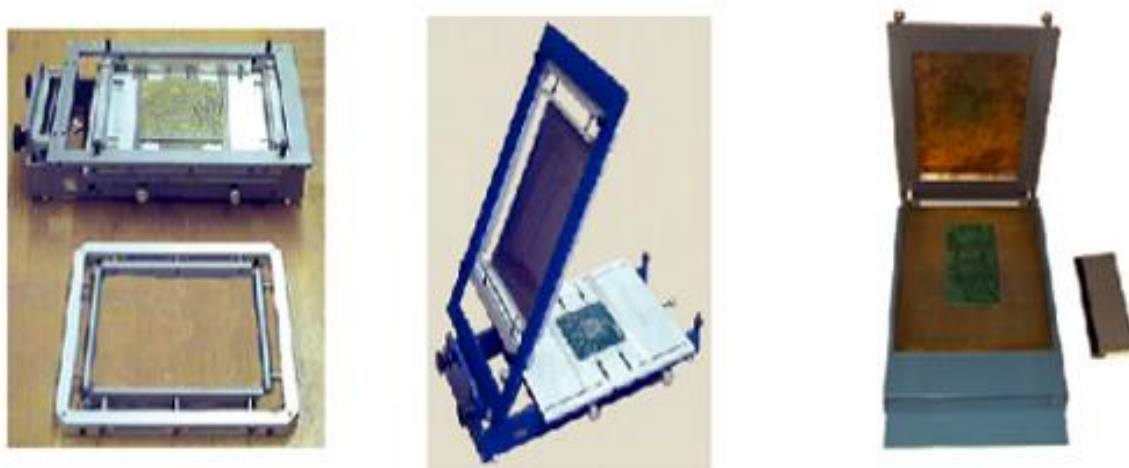


Рисунок 5 – Установка для трафаретной печати

«Предварительный нагрев материалов перед пайкой обеспечивает ряд преимуществ. Например, минимизируется риск термического шока, что, в свою очередь, уменьшает вероятность появления трещин и деформаций.

Прогрев изделий помогает быстро испарить летучие компоненты флюсов, необходимых для качественного соединения. Нагреваемые детали активизируют химические реакции в флюсах, значительно повышая их эффективность» [7].

«При выборе температурного режима для нагрева печатных плат учитываются конструктивные особенности и температура кипения используемого растворителя» [22]. Для спиртовых флюсов рекомендуется применять температурные режимы, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – «Температурные режимы» [3]

Тип печатной платы	Температура на плате
Односторонняя	80-90°C
Двухсторонняя	90-120°C
Многослойная (до 4-х слоев)	105-120°C
Многослойная (более 4-х слоев)	110-130°C

«При проектировании высокоэффективных многослойных печатных плат особое внимание уделяется температурным режимам, так как это обеспечивает надежность пайки в области металлизации сквозных отверстий. Тем не менее, при этом важно избегать перегрева, в частности, недопустимо превышать значение более 2°C/с. Иначе возможны повреждения компонентов. Прогрев печатной платы должен быть медленным, что позволит избежать чрезмерного удаления растворителей и образования пузырьков в паяльной массе. Это служит залогом высокой качества всех соединительных элементов. Кроме того, равномерное и плавное нагревание печатной платы – необходимое условие для безотказной пайки ее электронных компонентов» [19].

«Процесс нанесения паяльной пасты – это сложный многогранный процесс с множеством критических факторов: от характеристик принтера до особенностей трафаретов (состав, зернистость и другое). Каждое печатающее устройство имеет свои особенности, которые необходимо тщательно изучить

для получения качественной печати. Параметры трафарета: прочность, угол наклона, отделка» [17].

«Качественная пайка невозможна без учета множества факторов, определяющих эффективность использования припойной конструкции. Речь идет, в первую очередь, о составе флюса, содержании металла, средней величине частиц, вязкости пасты, а также об условиях окружающей среды, например, температуре, влажности, чистоте воздуха, которые также способны существенно повлиять на свойства пайки, а следовательно, и на качество соединения» [1].

«Существует два основных метода нанесения флюс-припоя на печатную плату – ручное и автоматизированное. В первом случае, как правило, используются механические трафареты, во втором – дозаторы, позволяющие наилучшим образом организовать работу или повысить ее производительность.

Пастовый дозатор – наиболее распространенное устройство, позволяющее быстро и качественно подавать припойный флюс и равномерно распределять его по поверхности платы. Важно отметить, что дозатор может интегрироваться в другие технологические процессы, связанные с монтажом и обработкой печатных плат на различных этапах их производства, благодаря своей высокой функциональности» [7].

«При работе с паяльной пастой используются стабилизированные дозаторы. Дозаторы обеспечивают равномерное распределение пасты по поверхности печатной платы, перемещаясь по рабочей области с гарантированной точностью, а управление производится специализированным персональным компьютером. Они способны обрабатывать до 15000 отверстий в час с максимальными размерами рабочей зоны 450x450 мм, но их тоннажность ниже, чем у трафаретных печатных форм, так как на это оборудование не требуется затрат на изготовление трафаретов. Ручное дозирование является наиболее предпочтительным для малосерийных и единичных партий печатных плат» [6].

«Ситуация меняется в массовых сериях печатных плат односторонней конструкции. При этом использование дозирующего метода является более экономически оправданным методом нанесения, поскольку трафарет оказывается более затратным в массовом производстве. Повышение расходов на трафареты (так как каждый трафарет нужен только для одной стороны платы) в условиях серийного производства делает полный переход на дозирующий метод неоправданным, так как при использовании трафаретной печати производительность и однородность процесса значительно возрастают. В массовом производстве плата за трафарет в расчет себестоимости, как правило, не включается» [20]. Трафаретная печать бывает ручной и автоматизированной. Ручной способ основан на применении простого механического устройства, состоящего из рамы, на которой закрепляется трафарет, и печатной платы. Оператор, используя ракель, переносит изображение на плату. «Автоматизированные трафаретные принтеры минимизируют участие человека в процессе и обеспечивают повышенные производственные мощности. Максимальные размеры печатных плат, которые могут обрабатываться принтером, составляют 510x510 мм, а скорость ракеля при этом достигает 150 мм/с» [17].

2.3 Пайка

«В начале термообработки печатных плат во время инфракрасной сушки печатная плата подвергается воздействию радиационного подогрева: температура постепенно возрастает» [18].

«На первом этапе нагрева печатной платы происходит радиационное облучение заданной длины волны, проникающее на значительную глубину в материал. Это способствует выведению легковоспламеняющихся веществ и обеспечивает максимальную эффективность процесса» [24]. Повышение температуры поверхности составляет 2-7°C/с, при этом слишком высокая

скорость нагрева может вызвать термическое повреждение керамических компонентов, в частности, многослойных конденсаторов.

«Вторая зона подогрева плоскочечатной платы нагревает её равномерно и предотвращает повреждение термочувствительных узлов. Нагрев в первой зоне со значительным тепловым градиентом, сниженный до термической устойчивости во второй зоне, создает условия для равномерного, а иногда и низкого, но необходимого для мелких деталей температурного режима» [17].

«На третьем этапе происходит плавление самозатвердевающего материала, обеспечивающее соединение пайкой. В конструкции платы осуществляется интенсивное импульсное облучение инфракрасными волнами короткого диапазона. Поддерживая температуру оболочки керамических компонентов в заданном диапазоне, предотвращают воздействие высокой температуры на элементы системы. Температура в узлах сборки повышается до 30-45°C, но не претерпевает значительных изменений» [20].

«При пайке в инертной газовой среде, образованной смесью гелия и паров калия, достигается оптимальное распределение расплавленного припоя по рабочей зоне. Это позволяет избежать образования шариков и минимизировать окисление флюсов. Смесью гелия и воды позволяет значительно увеличить угол смачивания и улучшить смачиваемость на различных полимерных и керамических поверхностях» [3].

«Согласно имеющейся практике, применение смесей инертных газов таких, как гелий с водородом, снижает окислительные процессы в процессе пайки, а флюсы адаптируются к особенностям конструкций, имеющих мягкие или плотные составы. Например, водородная гелиевая смесь, состоящая из водорода (5%) и гелия в пределах 1% снижает окисление, а гелиевая флюс-система, основанная на хлорфторуглероде, значительно увеличивает пределы термостойкости» [23].

В результате проведенных испытаний удалось установить, что детали с черным покрытием не подвергаются перегреву, а температура внутри корпуса заметно ниже, чем снаружи. При резкой смене температур происходит

существенное изменение температурного градиента благодаря теплопроводности и конвективным процессам. Крупногабаритные корпуса (SOIC-40) демонстрируют лучшую теплоотводящую способность по сравнению с миниатюрными аналогами (SOIC-8, SOT-23). Температурные изменения элементов печатной платы в зависимости от транспортной скорости (Рисунок 6).

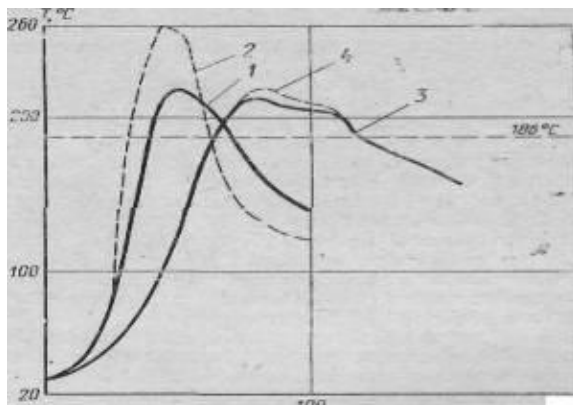


Рисунок 6 – Температурные изменения элементов печатной платы в зависимости от транспортной скорости

«При проведении термоиспытаний печатных плат с различной цветностью поверхности (от зеленого до черного) было установлено: Температура на черной поверхности колебалась в диапазоне 0,91-0,95°C при 230°C, что вносило изменения в диапазоне от $\pm 1^{\circ}\text{C}$ до $\pm 4^{\circ}\text{C}$ в соответствии с термопарами» [1].

«Определяющим условием равномерности температурного поля при пайке является расположение компонентов на печатной плате. Хотя среди множества факторов имеется много значимых характеристик, но, во-первых, наиболее важными для пайки являются геометрия и вес компонентов; во-вторых, влияние затеняющих элементов на процесс сборки остается менее

определённым. Установлено, что при увеличении расстояния между компонентами на плате от 2,5 до 5 мм вся масса сборки снизилась на 8%, а максимальная температура их плавления выровнялась до одного и того же уровня, что продемонстрировало их пропорциональную зависимость. Цветовые характеристики печатных плат и затеняющих компонентов уже не оказывают значительного влияния на нагрев детали, поскольку определяющими остаются габариты, а также масса» [6].

«Пайка двусторонних печатных плат сводится к использованию двух схем: одноуровневая и двухуровневая. В одноуровневой схеме обеспечивается нагревателями, находящимися как сверху, так и снизу, в двухуровневой схеме – только сверху. Вначале на плату монтируются компоненты с конвейера, затем плата переворачивается, чтобы осуществить пайку нижней стороны.

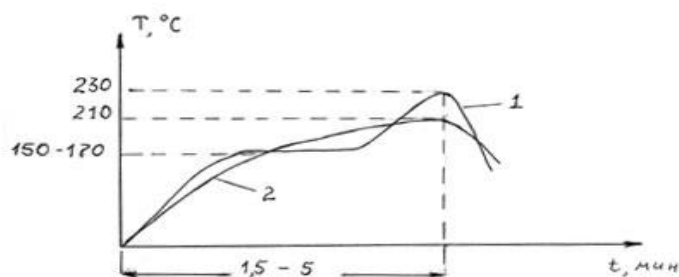
В то время как верхняя сторона платы уже облачена паяными элементами, которые благодаря поверхностному натяжению расплавленного припоя удерживаются в совершенно фиксированном положении, то есть исключается окончательное их смещение. Эта технологическая схема уже используется в производстве интегральных схем с J-образными выводами, а также чипов» [7].

Следующий важный аспект качества соединения касается контроля температуры и режима нагрева. Резкие температурные перепады способны вызвать нежелательные последствия: мгновенное испарение растворителей из паяльной пасты, чрезмерное плавление припоя и даже образование окисной пленки на поверхности соединения. Поэтому применение паяльной пасты в инертной газовой среде или использование жидких флюсов во время процедур пайки позволяет значительно снизить вероятность образования окислов и повысить прочность соединений. Такие флюсы часто содержат активные добавки и улучшители смачивания, которые оптимизируют качество сварного шва.

Перед началом пайки необходимо установить правильный температурный режим. Термопару целесообразно разметить в месте пайки как можно ближе к детали. На термопару ставят деталь, затем подключают её к термометру. Перед началом пайки печатную плату устанавливают на неподвижную подкладку. Необходимо выполнить температурные параметры: конвейер для пайки – накладка специальная для подплатника; скорость потока конвейера – $0,5 \pm 0,05$ м/мин.; температура в нагревателях печи – 300°C в первой зоне. Установка предназначена для пайки плашек емкостей с 256 контактами с толщиной слоя $2,5 \pm 0,025$ мм. Установка интегрируется в конвейерную линию комиссии и функционирует в установленных режимах: укладка подплатника на паяльный конвейер; скорость работы конвейера – $0,5 \pm 0,05$ м/мин.; температура в нагревателях печи в первой зоне – 300°C контроль контрольных операций по смене режима работы объемом не менее 150 м^2 .

Зная, что в данной зоне температурного режима установлено 150°C , а температура в системе при эксплуатации составляет 300°C , следовательно, производственный процесс требует включения конвейера.

При этом температурный режим в определенных зонах управления температурой задаётся непосредственно в момент выхода печи, по специальной температурной кривой, представленной на (рисунок 7) (кривая 1).



кривая 1 – трехзонный процесс пайки с несколькими температурными зонами
 кривая 2 – однозонный процесс с повышением температуры,
 характерный для инфракрасного отопления или генераторов

Рисунок 7 – Изменение температуры в зависимости от времени

«Наиболее рационально входить в значение заданной температуры, корректируя работу нагревательных элементов. Установленная температура в зоне, при установленной максимальной температуре 420°C, не должна быть ниже установленного значения, а в случае её несоответствия следует уменьшить скорость движения конвейера» [18].

«Для успешного процесса пайки максимально эффективно соблюдать температурный режим, чем поможет криволинейный график, изображенный на рисунке 7. В данной схеме (кривая 2) конструктивно предусмотрена регулировка температуры нагревателей. Микросхемы, различные компоненты с весом свыше 0,5 г должны быть установлены сверху, поскольку манипуляции производятся с нижней стороны. Это условие важно учитывать в топологии печатной платы. Правильная настройка режима работы печи обеспечит возможность не контролировать температуру нагреваемой поверхности в течение месяца пайки» [7].

«Инфракрасная пайка, обладая возможностью настройки температурных режимов, зачастую легко создает необходимые условия для пайки, что позволяет этим методом достигать высокой производительности, что обеспечивается его универсальностью. Расширение применения бессвинцовых припоев требует термопрофилирования, поскольку использование сплавов с высокой температурой плавления приводит к уменьшению оптимального температурного диапазона термопрофиля (разница между максимальным и минимальным значениями)» [24].

«Температура должна подводиться к конструктивному компоненту не слишком быстро, однако сам процесс пайки должен протекать как можно быстрее. Температурная кривая для метода пайки в ИК-печи представлена на рисунке 15 и является типичной для плат малого размера. На участке от 0°C до 90°C температура увеличивается приблизительно до 85°C. В течение этого времени происходит испарение летучих материалов, которые содержатся в паяльной пасте» [20]. На участке от 90°C до 120°C при температуре от 90°C до 130°C происходит удаление вязкостных добавок. На участке от 120°C до

200°C и при температуре от 130 °C до 180°C осуществляется активация частиц флюса, и протекают необходимые восстановительные процессы. На последнем участке от 200°C до 255°C достигается температура пайки 217°C.

На основании этих характеристик можно сделать вывод о том, что процесс пайки в ИК-печи сопряжен с определенным временно-температурным профилем, который необходим для достижения высококачественных результатов. Для более крупных печатных плат необходимо время предварительного нагрева до 3 мин. Данные по температуре инфракрасной печи (рисунок 8).

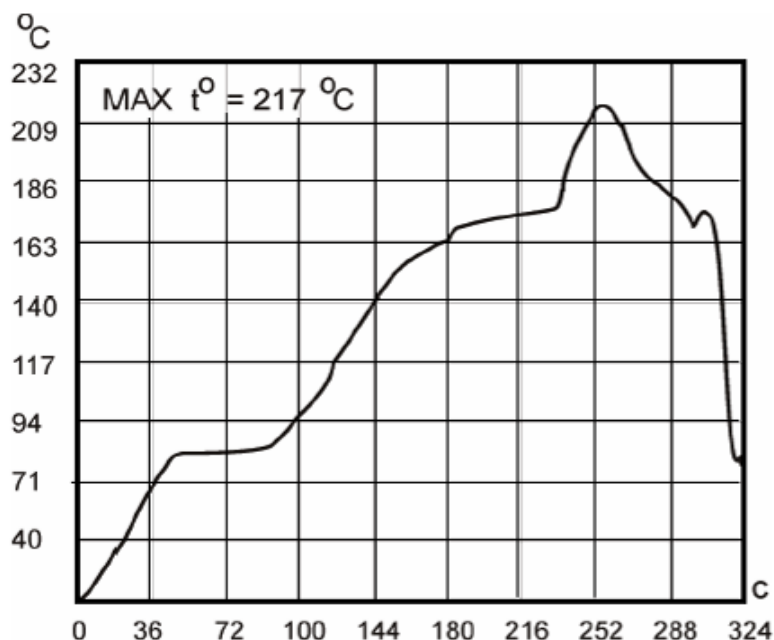


Рисунок 8 – Данные по температуре инфракрасной печи
(фиксировались на протяжении всей рабочей сессии)

«Современные ИК-печи обеспечивают высокоскоростное и надежное соединение полимерных материалов за счет широкого диапазона технологических решений. Температура в зоне ИС, достигаемая в процессе, нарастает за микросекунды, оставаясь ниже температуры плавления материала» [21].

2.4 Очистка плат после пайки и контроль печатных плат

«Внутренние полости обычных печатных плат (далее – ПП) соединены с окружающей средой через почти незаметные вертикальные зазоры между компонентами. Это часто приводит к накоплению остатков флюса и загрязнений, что, в свою очередь, вызывает коррозию и утечки с загрязнениями, проникающими в корпусные материалы. Для очистки плат применяются органические растворители, которые могут повредить элементы на плате. Загрязнения делятся на полярные и неполярные, а опасный механизм их действия заключается в коррозионном воздействии их взаимодействия с электродами и анионами. Загрязнения соединительных участков ведут к снижению качества проварки, а соответственно, к ухудшению адгезии защитного покрытия, что приводит к ухудшению электрических контактов и усложнению процесса тестирования микросхем и печатных плат» [14].

«Существует три основных класса органических растворителей, используемых для очистки печатных плат. К первому классу относятся гидрофобные растворители, обладающие малой растворимостью в воде. Они эффективно удаляют органические загрязнители, такие как жиры и канифоль. К группе гидрофильных растворителей относятся вещества, способные растворять как полярные, так и неполярные соединения. Тетрахлордифторэтан, фреон-113 и прочие вещества образуют третью группу. Сначала печатные платы очищают от загрязнений, оставшихся от флюсов с помощью растворителей и механических методов (погружение в химикаты, распыление, их сочетание). В большинстве случаев растворители подогревают и дополнительно обрабатывают ультразвуковыми волнами, создающими в чистящих растворах колебания, увеличивающие их взаимодействие с полимерной поверхностью» [13].

«Для качественной очистки необходимо знать, как правильно укладывать печатные платы в ванне так, чтобы обеспечить свободный доступ моющего средства к загрязненной поверхности» [4].

«При производстве печатных плат контроль необходимо выполнять на трех основных этапах:

1. Входной контроль.
2. Операционный контроль.
3. Выходной контроль.

На этапе серийного производства осуществляется контроль качества сырья в реальном времени. Каждое изделие, поступающее на сборочный конвейер, проверяется на соответствие техническим требованиям. В случае обнаружения несоответствий отклонений результаты фиксируются, и принимается решение о доработке или бракованные детали. Чаще всего контроль осуществляется с применением автоматизированных систем, исходя из специфики контроля на данном этапе» [24].

«Во время проведения технического контроля характеристик производственного процесса необходимо проверять ключевые параметры не только на выходе, но и на каждой стадии технологического процесса. Визуальный контроль, проводимый операторами, прошедшими обучение по утвержденной методике и контрольной схеме, занимает важное место в этом процессе. Для визуального контроля изделий и их элементов используются оптические приборы и микроскопы с увеличением от 2 до 10 раз как в процессе производства, так и в лабораторных условиях. Автоматизированные системы контроля качества внедряются на всех стационарных рабочих местах сборочных линий, охватывая весь технологический процесс: контроль нанесения пасты, позиционирования схем, отверждения адгезива, проверка после пайки» [6].

Оптимизация процесса трафаретной печати является особенно актуальной, поскольку именно в процессе трафаретной печати возникают частые дефекты. Они приводят к отбраковке готовой продукции на выходе, что сводит на нет все усилия, потраченные на предыдущие этапы работы.

Правильный контроль качества подложек после их отверждения является одним из важнейших процессов на производственных мощностях

крупных предприятий. Неправильные пропорции клея (недостаток или избыток) могут привести к смещению элементов на плате, что в конечном итоге вызывает дефекты при пайке из-за недостаточной точности сборки.

Недостаток специализированного оборудования для перемещения печатных плат может привести к критическим ошибкам. Например, ручная транспортировка печатной платы в камеру отверждения клея после установки компонентов может привести к шевелению компонентов относительно основания платы.

Для того чтобы эффективно решать поставленные задачи, следует прибегнуть к внедрению автоматизированных систем управления (АСУ), которые способны осуществлять контроль на всех стадиях производственного процесса, а именно: механической операции, заключающейся в нанесении пасты на поверхность печатной платы; фиксации трафарета на печатной плате; проверка после пайки.

В производстве в качестве контрольного инструмента используется автоматизированный оптический инспектор (далее – АОИ), который выполняет полное сканирование объекта с помощью высокотехнологической оптической системы, позволяющей формировать двумерные изображения, обрабатываемые специфическими источниками подсветки, придающими изображениям четкость.

Основные параметры используемого оборудования:

- стандартный размер поля зрения составляет 30х50 миллиметров;
- размытое изображение может иметь размеры 6х8 миллиметров;
- скорость сканирования устанавливается в пределах 18-36 см²/сек с одновременной обработкой более 70 изображений.

АОИ имеют разнообразные конструкции и могут работать как в одноцветном, так и в многоцветном режиме. Основные параметры, влияющие на их производительность, – это тепловые эффекты, возникающие при эксплуатации различных цепей и компонентов. Под воздействием тепла могут

возникать помехи, которые оказывают негативное влияние на качество контроля. Однако в практике уже реализованы программные продукты и конструктивные решения, которые значительно снижают влияние температурных факторов. На первом этапе происходит контроль печатной платы, в ходе которого осуществляется её сканирование с формированием матрицы. После этого полученная матрица изображения сравнивается с матрицей образца (как правило, с данными о сборке), а соприкосновение этой матрицы с матрицей образца производится на основе информации, зарегистрированной в файлах CAD, Gerber и т. д.

Достижения в области автоматического оптического контроля (далее – АОК) задали новый темп мониторинга, обеспечив обработку до 150000 единиц за секунду. Это обеспечивает постоянный и полный контроль целого ряда параметров объектов контроля. Но у технологий АОК есть и недостатки: они являются высокочувствительными к малейшей вариативности материалов печатных плат или комплектующих. Текущие системы АОК уверенно решают задачи обнаружения ошибок размещения компонентов, но продолжают испытывать трудности с дефектами в процессе нанесения паяльной пасты и пайки. Некоторые производители уже опробовали экономичные оптические системы, разработанные для создания форматов трехмерных визуальных моделей объектов контроля.

Лазерные системы, внедряемые в автоматизированные производственные линии, формируют новый подход к контролю качества. Они позволяют осуществлять полную визуализацию изделий и эффективно обнаруживать недостатки, такие как недостающие элементы. Эти устройства особенно полезны, когда визуальная инспекция затруднена, например, для проверки якорей, реперных точек или отверстий разной глубины. В отличие от традиционных методов визуального контроля, лазерные системы ориентируются на уровень отраженного света от конструкции, а не формируют визуальные изображения. Потеря отраженного света в лазерной

области служит сигналом о недостающем элементе, что отражается в управляющей программе системы.

Рентгеновская контрольная технология (далее – РКТУ) представляет собой усовершенствованный способ рентгенографического анализа, позволяющий исследовать качество пайки, внутренние слои ПП и труднодоступные соединения, такие как шариковые выводы BGA. Основное действие рентгеновских лучей заключается в их способности проникать через плотные материалы с различной степенью поглощения в зависимости от плотности структуры исследуемого объекта. Операторы выбирают рабочее напряжение рентгеновских трубок для оценки различных материалов: например, для оценки пластиковых ПП используют 30 кВ, а для пайки BGA – 100 кВ.

Разрешение рентгеновских снимков колеблется в пределах от 0,5 до 1 мкм, что обеспечивает высокую четкость изображений. Однако механизмы, используемые для преобразования рентгеновских сигналов в электрически доступную информацию, требуют применения сложных алгоритмов, поскольку обычные оптические линзы не способны фокусировать рентгеновские лучи.

В производственной сфере печатных плат активно применяется рентгеновская инспекция, которая позволяет выявлять дефекты в таких параметрах, как ширина проводящих дорожек, расслоение диэлектриков и другие. Однако рентгеновские установки обладают высокой стоимостью, низкой производительностью, а также требуют значительных затрат на техническое обслуживание и эксплуатацию.

Контроль электрических цепей, в том числе тестирование печатных плат, осуществляется в процессе диагностики с использованием адаптеров и метода снятия «контактного поля». Исследование проходит в двух режимах: первом низковольтном (до 10 В), предназначенном для поиска обрывов и коротких замыканий; втором высоковольтном (до 500 В), используемом для обнаружения пробоев и утечек тока. Установка тестовых контактов в

специальные отверстия печатных плат позволяет за короткое время (в десятки секунд) локализовать повреждения. Ключевым элементом этого процесса являются контактные элементы, от крепости соединения которых напрямую зависит качество диагностики. Применение пружинного механизма соединения обеспечивает надежное взаимодействие тестовых элементов.

Традиционные методы диагностики, такие как «полевые контакты» и «летучие пробники», имеют определенные ограничения, особенно для многослойных печатных плат. Их использование связано с рисками: отсутствует возможность точно определить место повреждений в проводящих дорожках, что может затруднить ремонт.

В условиях высокой цены компонентов многослойных плат и значительного количества отклонений в производственном процессе особенно актуальны методы точной локализации и устранения дефектов. Применение таких методов необходимо в серийном тестировании многослойных плат на этапе проектирования. Один из них, в частности, называется «векторным поиском». Суть заключается в подаче на поврежденную линию напряжения, а затем в измерении изменения тока при перемещении пробника по плате. Для этого необходим высококачественный измерительный инструмент, такой как миллиомметр, миллиамперметр или микровольтметр.

2.5 Выбор припойной пасты

Пайка печатных плат и микроузлов традиционно применялась с пастами. С внедрением технологий поверхностного монтажа стали актуальными новые составы. Инженерно-технологический процесс определяет выбор материалов с учетом специфики процессов. Свойства паст зависят от их базового состава (рисунок 9).



Рисунок 9 – Карта выбора паяльных паст

Состав паяльных паст многозначен и разнообразен. Содержащийся в них паяльный порошок разнообразен по структуре. Основной составляющей является припой: его содержание может колебаться от 85-92% при среднем значении 88%. Паяльные пасты принято классифицировать по основному металлу, входящему в состав сплавов. Например, припойный сплав марки 63/37 (63% Sn, 37% Pb) может быть модифицирован путем значительного увеличения содержания серебра. В усовершенствованном варианте состав может быть представлен как 55/35/10, где 10% составляет серебро (Ag). Таким образом, характер пайки во многом зависит от диаметров частиц паяльной пасты, а также от их физико-химических характеристик.

Размер частиц обозначается mesh – номером сита. Например, 200/+325 говорит о том, что частицы проходят через сетку 200, но не проходят через 325. При трафаретной печати диаметр частиц припоя желательно делать равным 50% высоты ячейки трафарета.

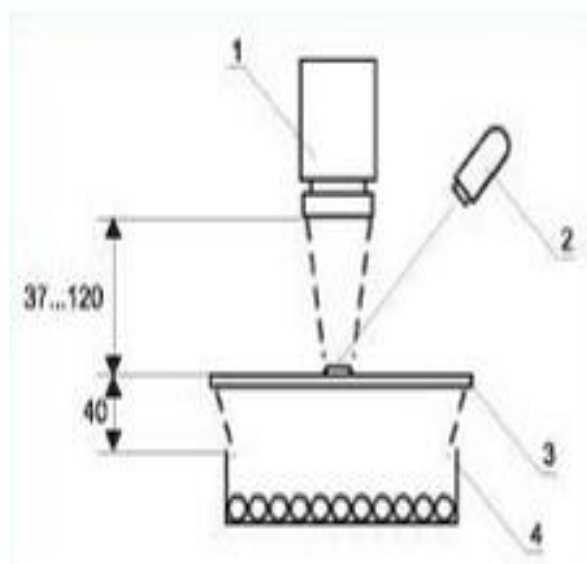
Установлено, что форма частиц является важным параметром при трафаретной печати. По результатам экспериментов, оптимальными для этого процесса оказались овальные гранулы. Сложно-геометрически оформленные частицы, напротив, значительно увеличивают риск перебоев в подаче пасты, ведут к забиванию трафаретов. Неоптимальный выбор формы также может увеличивать время окислительных процессов и ухудшать качество спаиваемых соединений. Шарообразные частицы оказывают стабилизирующее действие на процесс печати и обеспечивают однотипные характеристики печатных плат независимо от поставок.

2.6 Технологическое оснащение для пайки ИК-излучением

Для ИК пайки в зависимости от решаемых задач могут использоваться различные варианты оборудования. Для ремонта, а также при малой программе выпуска наиболее эффективны паяльные станции с местным нагревом, при увеличении программы выпуска рационально использовать камерные печи, а при дальнейшем увеличении программы (крупносерийное и массовое производство) – проходные конвейерные печи.

Рассмотрим использование инфракрасного излучения в паяльных станциях.

На рисунке 10 изображена паяльная станция с основными её компонентами.



1 – инфракрасная оптика; 2 – пирометр; 3 – плата; 4 – кварцевый нагреватель

Рисунок 10 – Схема паяльной станции

«Локальная инфракрасная пайка предназначена для определённой области печатной платы, нагревая её излучением инфракрасным, излучением, сфокусированным воедино, чтобы тепло не расплзлось по всей конструкции. Такой вариант можно использовать при ремонте, а также при малой программе выпуска изделий. Система состоит из двух нагревательных элементов, один нижнюю часть платы подогревает до предварительной температуры, другой точно паяет до плавящейся температуры. Ремонт плат BGA-микросхем делает» [8].

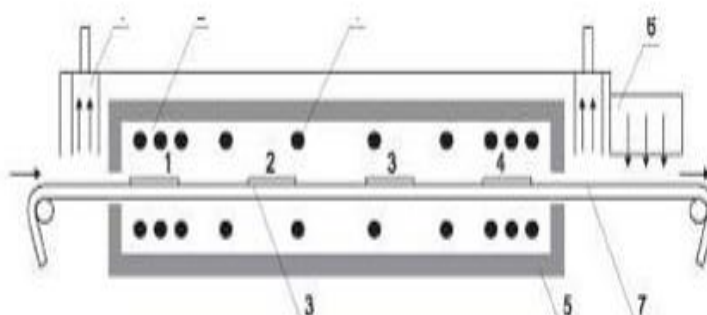
Паяльная станция PDR отличается уникальной оптической системой, обеспечивающей высокоточную ИК-фокусировку и наличие красной подсветки для удобства наведения. Регулировка фокуса осуществляется с помощью линз, а цифровой контроллер с бесконтактным датчиком обеспечивает контроль температуры во время пайки.

По своей конструкции ремонтный комплекс, представляет собой высокотехнологичное решение для пайки, распайки и монтажа SMD-компонентов (разъемов, микросхем и т.д.) (рисунок 11).



Рисунок 11 – Паяльная система IR-X410

В процессе ИК-пайки неравномерный тепловой поток вызывает градиент температур на поверхности модуля, что приводит к дифференциальному расширению материалов и возникновению термоупругих напряжений. Ключевые технологические проблемы: Инфракрасная печь, работающая ламповым способом, имеет несколько зон термообработки, в которых расположены трубчатые инфракрасные лампы и над конвейерной лентой, и под ней (рисунок 12).

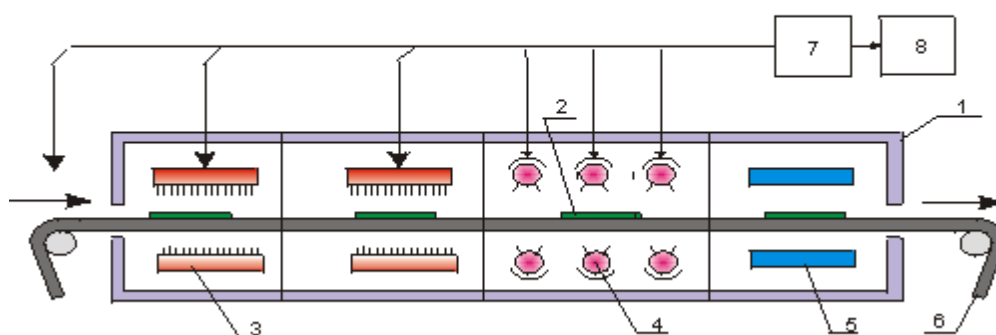


1 – вытяжная вентиляция; 2 – матрица ИК ламп; 3 – плата; 4 – ИК лампа; 5 – отражатель; 6 – устройство охлаждения; 7 – конвейер

Рисунок 12 – Установка ИК лампового нагревателя

Современные ИК-нагревательные установки с ламповыми излучателями и зеркальными отражателями переопределили понятие «достаточной температуры». Эти системы стали эталоном технологичной термообработки благодаря прецизионному управлению тепловым излучением. Обеспечивая равномерное распределение энергии за счет контролируемой теплопередачи, они позволяют формировать зону предварительного нагрева с температурными параметрами, близкими к минимально допустимым технологическим пределам. Керамические панели разных мощностей и дифференцированные температуры, позволяющие пользователю контролировать нагрев, однако производители имеют недостаточную конструктивную гибкость. Инфракрасный излучатель состоит из трех основных частей. Первая, контактирующая с обрабатываемой поверхностью, может быть выполнена из стекла, керамики или металла, в зависимости от условий ее работы и предпочтений. Она может быть как вторичным излучателем, так и прозрачным окном. В первом случае эффективность теплопередачи зависит от свойств верхнего слоя, на нем слой пыли не учитывается. Второй компонент, первичный нагреватель, выполнен из материала резистивного типа (фольга или спираль). Третий элемент изоляция, выполненная из тугоплавких керамик, защитит конструкцию. Инфракрасные панели Panel IR System могут использоваться в диапазоне длин волн 3...10 мкм. Они представляют собой крупные керамические устройства, которые работают при температурах от 200°C до 450°C и оснащены воздушной камерой с инертным газом, обеспечивающей равномерное теплоотдачу. Энергетическая эффективность составляет 60% от конвекции и 40% от инфракрасного излучения, а перепад температур между нагревателем и объектом составляет всего 30-40°C, что обеспечивает почти равноценный режим нагрева. И все же такая система нивелирует главный плюс инфракрасного обогрева, ее реагирующую скорость и адаптивность. Это обязательно наличие у конечного продукта.

Системы комбинированного нагрева – ламповые инфракрасные и панельные нагреватели позволяют значительно увеличить гибкость отопления и предоставить возможность формирования необходимого количества нагревательных зон. Инфракрасная установка (рисунок 13) для оплавления состоит из корпуса 1, внутри которого располагается несколько зон нагрева, обеспечивающих заданные температуры. Первые две зоны снабжены плоскими нагревателями 3 для предварительного прогрева деталей 2; в третьей зоне предмет быстро нагревается с помощью кварцевых инфракрасных ламп 4 до температуры немного выше точки плавления флюса, после чего производится охлаждение с помощью устройства 5.



1 – корпус; 2 – печатная плата; 3 – плоские ИК нагреватели (панели); 4 – кварцевые ИК лампы; 5 – охладитель; лента конвейера; 7 – микропроцессор; 8 – дисплей

Рисунок 13 – Схема установки инфракрасной пайки ИК-излучением

«Ленточный конвейер из нержавеющей стали предназначен для перемещения печатных плат. Микропроцессорная система управления нагревательными элементами и скоростью ленты позволяет устройству запоминать предустановленные режимы плавления, подходящие для печатных плат различных размеров. Температура отображается на цифровом дисплее в графической и цифровой форме, а также доступна гибкая настройка температурного режима. Стандартные режимы могут быть адаптированы к печатным платам различных форматов» [11].

Вентиляционные технологии, применяемые в данном оборудовании, обеспечивают высокое качество размещения компонентов, что влияет на надежность сборки. Неотъемлемой особенностью комплекса является обеспеченность фактического контроля температуры, что позволяет поддерживать заданные температурные условия. Параллельно с этим в комплексе целесообразно формирование индивидуальных термографических профилей с контролем температур, осуществляемым в восьми контрольных точках.

На первом этапе пайки применяется двухсторонний прогрев с диапазоном температур от 100°C до 270°C, при этом нижние нагреватели могут быть отключены. В арсенале установки современный микропроцессорный контроллер, работающий с девятью температурными профилями, которые отображаются на ЖК-дисплее. Общее время пайки составляет 20-30 минут, что резко повысило производительность.

Печь состоит из четырех верхних инфракрасных ламп мощностью 1000 Вт и шести нижних керамических нагревателей по 400 Вт, система вентиляции, отвечающая за равномерный прогрев всей поверхности. В результате снижается риск перегрева печатной платы с крупными компонентами. Процесс предварительного прогрева длится всего три минуты, плавление – столько же, после чего плата автоматически поступает в зону пайки. Производительность установки составляет около 40 европлат в час. В комплекте поставляется программное обеспечение для мониторинга термопрофиля и времени пайки на компьютере.



Рисунок 14 – мини-агрегата, работающего в инфракрасном тепловом режиме

Печь ТТ-500А, разработанная компанией ERSA, представляет собой настольное устройство, идеальное для малосерийного производства. Обширный функционал этой печи включает 28 термoproфилей, что открывает широкий спектр возможностей для её применения (рисунок 15).



Рисунок 15 – Настольная конвекционная инфракрасная печь

Конструкция паяльной установки предусматривает возможность обработки печатных плат формата не более 300x400 мм, при этом высота устанавливаемых компонентов не должна превышать 40 мм. Для обеспечения заданного температурного режима непрерывного процесса пайки печатных плат конструкцией печи предусмотрено использование двух контактных термометров и одного прибора, фиксирующего температуру в центре печи и передающего тепловую информацию на дисплей.

К установке «Радуга» для инжекционного плавления паяльных паст отнесены устройства для монтажа плат с поверхностными компонентами. Установка позволяет осуществлять пайку с одной или обеих сторон плат, имеет конструкцию, включающую в себя нагревательную камеру с плоскими нагревателями, поддерживающими температурный диапазон от 100°C до

300°C. В печи Установка «Радуга-10» (рисунок 17) нагрев осуществляется при ручной подаче плат, управлением процессом пайки обеспечивает группа технических блоков, в которые входят устройства для нагрева, управления и контроля температуры термопарами типа ХК.

Информация о температуре передается в микропроцессорную систему для осуществления поддержания теплоносителем установленного температурного режима в процессе пайки. Существует также программа, фиксирующая время пайки, контролируемая цифровым таймером. Контроль температуры процесса пайки осуществляется контрольным измерителем, фиксирующим температурные параметры и время пайки в печи.

Конвейерная инфракрасная печь (рисунок 17) оснащена многозонной ИК-нагревательной камерой. Температуру в каждой из зон этой камеры можно настраивать индивидуально, варьируя температуру в зависимости от специфики обрабатываемого изделия. Все процессы печи контролируются с помощью удобного пульта управления. Данная модель печи также включает загрузочные и разгрузочные устройства, которые работают с электрооборудованием.



Рисунок 17 – Конвейерная система инфракрасной пайки

«Печь для термопластов (ГКТ) с ИК модуляцией, разработанная компанией Heller Industries Ins., обеспечивает неравномерный нагрев печатных плат за счет использования специальной конструкции излучающих панелей и активных конвекционных потоков воздуха. Микропроцессорное управление, обеспечивающее равномерную температуру всего изделия, гарантирует стабильное качество готовой продукции» [15].

Более того, установка может обрабатывать изделия как с одной стороны, так и с обеих, что позволяет использовать несколько типов матриц: стеклотекстолит, эмалированную сталь и керамику.

Система инфракрасного плавления MI00 от компании Radiant Technology Corp. предназначена для настольного применения и может достигать температур 300°C при условии поддержки до 1200 мм габаритов базового блока. Установка подходит для оплавления гибридных интегральных схем в условиях, когда другими способами данный процесс недоступен.

ИК печь F-300 с габаритной рабочей камерой 235x375x600 мм применяется для переработки полимеров. Температура в печи достигает 800°C, а как рабочий процесс используется углекислый газ.

Части устройства – обогреватель верхний, устройство охлаждения нижнее, чтобы компоненты не теряли целостности. Инфракрасные лампы краевые – чтобы обогреть конструкцию равномерно, лампы типа ТЗ – сосредоточить теплоту в точке пайки.

Прибор BGK 1648 – инфракрасный, с ТЗ стандартом и кварцем в активе, с конвейером ленточным 450 мм в ширину из нержавеющей стали с температурным контролем в восьми зонах, и с управлением от ПК с отображением графиков на квадратном дисплее.

Система Precisold – автоматическая, с пятью этапами процесса инфракрасного оплавления печатной платы (загрузка, подогрев, оплавление настаиваемой платой, охлаждение, возвращение в загрузочную зону). Платы, что она оплавляет, были до 200 на 300 мм, и температура может до -280°C понижаться -30°C.

3 Безопасность и экологичность при реализации технологического процесса инфракрасной пайки

3.1 Общие требования к обеспечению безопасности технологического процесса

Технология инфракрасной пайки сопряжена с применением оборудования, выделяющего тепловую и инфракрасную энергию, а также с обращением с потенциально опасными веществами (флюсами, паяльными пастами, парами растворителей). Производственные факторы:

инфракрасное излучение;

повышенные температуры нагревательных элементов;

парогазовые выбросы от флюсов и паст;

движущиеся элементы (конвейерные ленты, механизмы подачи плат).

Все операции должны производиться в строгом соответствии с [ГОСТ 12.3.002-75 «Процессы производственные. Общие требования безопасности»] и [ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»].

Таблица 4 – «Идентификация производственных опасностей на участке ИК-пайки» [8]

Опасный фактор	Вероятный источник	Меры защиты
Инфракрасное излучение	ИК-лампы, панели	Экранирование, автоматизация
Перегрев оборудования	Сбой термостата, ошибки оператора	Термореле, сигнализация, обучение
Вдыхание паров флюса	Распыление, испарения	Вентиляция, вытяжные шкафы, СИЗ
Поражение током	Электрические панели	Заземление, ПУЭ, обучение, СИЗ
Порезы и защемления	Механика подачи плат	Ограждение, инструкции, обучение

3.2 Средства индивидуальной и коллективной защиты

Работа на участке ИК-пайки требует применения СИЗ в соответствии с [ГОСТ 12.4.011-89]:

Одежда: хлопчатобумажная спецодежда 2-го класса защиты.

Перчатки: термостойкие, химически устойчивые (флюсы, пасты).

Очки: закрытого типа с ИК-фильтрами (ГОСТ Р 12.4.013-2011).

Респираторы: марки FFP2 или FFP3 при флюсовании.

Обувь: диэлектрическая, антискользящая.

Для коллективной защиты организуются:

Местная вытяжная вентиляция (над флюсовальной и паяльной зоной);

Сигнализация перегрева оборудования;

Ограждение подвижных механизмов;

Автоматическое отключение питания при аварии;

Заземление оборудования и соблюдение ПУЭ.

Таблица 5 – «Применяемые СИЗ по видам воздействия» [9]

Вид опасности	Применяемое СИЗ
ИК-излучение	Очки с ИК-фильтром
Вдыхание аэрозолей флюса	Респиратор FFP3
Повышенная температура	Перчатки термостойкие, спецодежда
Электробезопасность	Диэлектрическая обувь, коврики
Возможность пореза/удара	Защитные перчатки, экраны механизмов

3.3 Вентиляция и контроль микроклимата

Основным направлением обеспечения безопасности является удаление паров флюса и растворителей, возникающих при распылении и пайке. В помещениях ИК-пайки должны использоваться:

Локальная вытяжка с производительностью не менее 300 м³/ч на каждую установку;

Общеобменная вентиляция с 3–5 кратным воздухообменом;

Температура: 18–24°C, относительная влажность: 40–60% ([СНиП 41-01-2003]).

Рекомендуется применение воздушных фильтров тонкой очистки (НЕРА) для очистки воздуха от аэрозолей. Параметры микроклимата приведены в таблице 6.

Таблица 6 – «Параметры микроклимата и вентиляции» [11]

Параметр	Нормативное значение
Температура воздуха	18–24 °C
Влажность	40–60%
Вентиляция (кратность обмена)	3–5
Скорость воздуха на рабочем месте	0.2–0.5 м/с
Концентрация аэрозолей флюса	Не более ПДК по СанПиН 1.2.3685-21

3.4 Оценка экологической безопасности процесса пайки

В процессе инфракрасной пайки могут выделяться следующие вещества:

пары растворителей (изопропанол, бутанол),

органические кислоты из флюсов,

микрочастицы олова и свинца при использовании свинцовых припоев.

Необходимо контролировать выбросы в атмосферу, проводить сбор и утилизацию флюсовых остатков согласно ФККО (например, код 51322000000 – отходы неорганических солей тяжелых металлов).

Рекомендуется использование бессвинцовых паяльных паст на основе сплава Sn-Ag-Cu и внедрение замкнутых систем вентиляции с фильтрацией.

Таблица 7 – «Оценка экологических параметров пайки» [11]

Показатель	При использовании Sn-Pb	При использовании Sn-Ag-Cu
Токсичность отходов	Средняя	Низкая
Количество летучих флюсов	Высокое	Среднее
Объем отходов паст	100 г/партия	70 г/партия
Уровень загрязнения воздуха	До 1,2 ПДК	$\leq 0,5$ ПДК

3.5 Пожарная безопасность и обращение с опасными веществами

Паяльные пасты, растворители и флюсы относятся к легковоспламеняющимся жидкостям (ЛВЖ). Работы должны проводиться с учетом:

- ГОСТ 12.1.004-91 – Пожарная безопасность;
- СНиП 21-01-97 – Пожарная безопасность зданий и сооружений;
- Категория помещений по взрывопожарной опасности – В1г.
- Меры:
- хранение паст и флюсов в металлических шкафах;
- наличие огнетушителей ОП-4, ОУ-2;
- установка датчиков загазованности и автоматики отключения вентиляции;

Таблица 8 – «Пожароопасные вещества и меры обращения» [16]

Вещество	Класс опасности	Температура вспышки	Меры безопасности
Изопропанол	3 класс	+12°C	Закрытая тара, хранение в шкафу
Канифольный флюс	4 класс	+32°C	Снижение температуры
Паяльная паста	4 класс	+80°C	Недопуск перегрева

3.6 Организация производственного контроля и обучение персонала

Производственный контроль организуется по Постановлению № 2464 от 01.12.2020 г. Основные направления:

- проверка состояния вентиляции;
- измерение температуры и влажности;
- лабораторный анализ воздуха на аэрозоли флюсов;
- аудит СИЗ и технического состояния печей.
- Обучение включает:
 - вводный и целевой инструктажи;
 - курсы по ГО и ЧС, электробезопасности;

Таблица 9 – Формы производственного контроля и их частота

Контрольный параметр	Метод контроля	Частота
Состояние вентиляции	Акт проверки, журнал	Ежемесячно
Температура пайки	Термопрофилирование	Каждая партия
Загазованность воздуха	Газоанализатор	1 раз в квартал
Использование СИЗ	Визуальный контроль	Еженедельно

«Реализация технологического процесса инфракрасной пайки требует строгого соблюдения норм охраны труда, промышленной санитарии и экологической безопасности. В процессе пайки присутствуют различные опасные и вредные производственные факторы — инфракрасное излучение, высокие температуры, аэрозоли флюсов, пары растворителей, электрическое напряжение, подвижные механизмы, — что обуславливает необходимость применения комплекса защитных мер» [12].

Применение средств индивидуальной защиты (СИЗ), таких как термостойкая одежда, респираторы, очки с ИК-фильтрами и диэлектрическая обувь, позволяет значительно снизить уровень воздействия на персонал. Средства коллективной защиты, включая вытяжную вентиляцию, ограждения, автоматические системы отключения, а также организацию системного контроля микроклимата, обеспечивают дополнительный уровень безопасности и устойчивости технологического процесса.

Особое внимание уделяется вопросам экологичности. Инфракрасная пайка выгодно отличается от других методов минимальным количеством вредных выбросов, отсутствием необходимости использования ванн с расплавленным припоем или химических паров, а также возможностью применения бессвинцовых паяльных паст. Это позволяет снижать токсичность отходов, уровень загрязнения воздуха и объем утилизации флюсовых остатков, что соответствует современным экологическим стандартам (в том числе ISO 14001) и принципам ESG (экологическое, социальное и корпоративное управление).

Меры пожарной безопасности также являются важнейшим элементом производственной организации: необходима защита от ЛВЖ (флюсы, растворители), установка датчиков загазованности, соблюдение требований ГОСТ и СНиП, оснащение рабочих зон огнетушителями.

4 Оценка экономической эффективности применения инфракрасной пайки

4.1 Исходные данные для экономических расчетов

«Инфракрасная пайка - современная технология, позволяющая повысить качество монтажа радиоэлектронных компонентов при снижении производственных затрат. Внедрение ИК-пайки особенно актуально для мелкосерийного и ремонтного производства, где важны гибкость, экономичность и воспроизводимость» [12]. Оценки экономической эффективности инфракрасной пайки представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Исходные данные для оценки экономической эффективности инфракрасной пайки

Параметр	Значение
Объем производства изделий в месяц	1000 шт.
Стоимость традиционного оборудования (паяльная станция + вытяжка)	70 000 руб.
Стоимость ИК-паяльной станции T862++	45 000 руб.
Производительность ручной пайки (1 оператор)	4 платы/час
Производительность ИК-пайки (1 оператор)	8 плат/час
Средняя зарплата оператора	40 000 руб./мес.
Стоимость флюса и расходников на 1 плату	10 руб.
Энергопотребление традиционного оборудования	200 Вт
Энергопотребление ИК-станции	150 Вт

4.2 Расчёт затрат на оборудование и материалы

Рассчитаем суммарные затраты на оборудование и монтаж для одного производственного цикла (1 месяц):

Традиционная пайка:

Оплата труда:

Время пайки = $1000 \text{ плат} \div 4 \text{ платы в час} = 250 \text{ часов}$

Затраты на оплату труда = $250 \times 160 \text{ руб./час} = 40\,000 \text{ руб.}$

Расходные материалы:

$1000 \text{ плат} \times 10 \text{ руб.} = 10\,000 \text{ руб.}$

Электроэнергия:

$250 \text{ ч} \times 0,2 \text{ кВт} \times 6 \text{ руб./кВт}\cdot\text{ч} = 300 \text{ руб.}$

Итого по традиционной пайке:

$40\,000 + 10\,000 + 300 = 50\,300 \text{ руб.}$

Инфракрасная пайка:

Оплата труда:

Время пайки = $1000 \text{ плат} \div 8 \text{ плат в час} = 125 \text{ часов}$

Затраты на оплату труда = $125 \times 160 \text{ руб./час} = 20\,000 \text{ руб.}$

Расходные материалы:

$1000 \text{ плат} \times 10 \text{ руб.} = 10\,000 \text{ руб.}$

Электроэнергия:

$125 \text{ ч} \times 0,15 \text{ кВт} \times 6 \text{ руб./кВт}\cdot\text{ч} = 112,5 \text{ руб.}$

Итого по инфракрасной пайке:

$20\,000 + 10\,000 + 112,5 = 30\,112,5 \text{ руб.}$

Экономия при переходе на ИК-пайку:

$50\,300 \text{ руб.} - 30\,112,5 \text{ руб.} = 20\,187,5 \text{ руб. в месяц}$

4.3 Сравнительный анализ себестоимости с другими методами пайки

Таблица 11 – «Сравнение ориентировочной себестоимости пайки одной платы при различных методах» [12]

Метод	Себестоимость пайки 1 платы, руб.	Примечание
Ручная пайка	50,3	Низкая производительность
Волновая пайка	25–30	Требуется дорогостоящее оборудование
ИК-пайка	30,1	Минимальные затраты, быстрая настройка

ИК-пайка обеспечивает экономию до 40% по сравнению с ручной пайкой, не уступая по качеству пайки и удобству эксплуатации.

4.4 Оценка капитальных вложений и окупаемости

Таблица 12 – «сравнение капитальных затрат» [12]

Вариант	Стоимость оборудования	Срок службы, лет
Ручная пайка (паяльная станция)	70 000 руб.	5 лет
ИК-пайка (Т862++)	45 000 руб.	5 лет

Годовая экономия при переходе на ИК-пайку:
 $20\,187,5 \times 12 \text{ мес.} = 242\,250 \text{ руб.}$

Окупаемость оборудования:
 $45\,000 / 20\,187,5 \approx 2,2 \text{ месяца}$

Таким образом, вложения в ИК-станцию окупаются менее чем за 3 месяца, а в дальнейшем приносят чистую экономию.

4.5 Расчёт показателей экономической эффективности

- Основные показатели:
- Снижение затрат на оплату труда: на 50%
- Снижение потребления электроэнергии: на 25%
- Снижение себестоимости платы: с 50,3 до 30,1 руб.
- Срок окупаемости: менее 3 месяцев
- Рост производительности: в 2 раза

4.6 Применимость инфракрасной пайки для крупносерийного производства

«Себестоимость пайки включает затраты на оплату труда, расходные материалы, амортизацию оборудования и потребление электроэнергии. Инфракрасная пайка показывает сбалансированный результат – 31 руб. на плату, что выгоднее по сравнению с лазерной (48 руб.) и конденсационной (38 руб.) пайкой и лишь немного дороже волновой пайки (28 руб.).

ИК-пайка требует меньше времени на пайку одной платы, снижает затраты на электричество и уменьшает зависимость от квалификации оператора. Внедрение ИК-технологии в производственную линию позволяет экономить до 240 000 рублей в год только за счёт снижения расходов на оплату труда и энергопотребление. Себестоимость пайки (рисунок 18).



Рисунок – 18 Себестоимость пайки (руб.за плату)

Общая себестоимость пайки одной платы

$$C_{\text{общ}} = C_{\text{труд}} + C_{\text{мат}} + C_{\text{энер}} + C_{\text{амор}} + C_{\text{обсл}}$$

где:

$C_{\text{общ}}$ — полная себестоимость пайки одной платы (в рублях);

$C_{\text{труд}}$ — затраты на оплату труда оператора;

$C_{\text{мат}}$ — стоимость расходных материалов (флюс, паста, припой);

$C_{\text{энер}}$ — затраты на электроэнергию;

$C_{\text{амор}}$ — амортизационные отчисления оборудования;

$C_{\text{обсл}}$ — расходы на техническое обслуживание и ремонт.

Затраты на оплату труда

$$C_{\text{труд}} = \frac{N}{P} \cdot S$$

где:

N — количество плат в месяц (шт.);

P — производительность пайки (плат/час);

S — часовая ставка оператора (руб./час).

Затраты на расходные материалы:

$$C_{\text{материал}} = T_{\text{норма}} \times C_{\text{на_плату}}$$

где:

$C_{\text{на_плату}}$ — стоимость материалов на одну плату (обычно 10–15 руб.)

Итоговая себестоимость одной платы:

Если $C_{\text{пайки}}=30$ 112.5 руб. то:

Производительность технологии пайки – ключевой параметр в условиях крупносерийного производства. Инфракрасная пайка обеспечивает до 120 плат в час, превосходя конденсационную (80 плат/час), лазерную (50) и даже волновую пайку (100).

Благодаря равномерному и программируемому нагреву, ИК-установки сокращают время термоциклов и позволяют быстро адаптировать производственный процесс под изменения в номенклатуре плат. Это делает инфракрасную пайку особенно выгодной в гибких и масштабируемых производственных цепочках. Производительность (рисунок 19).

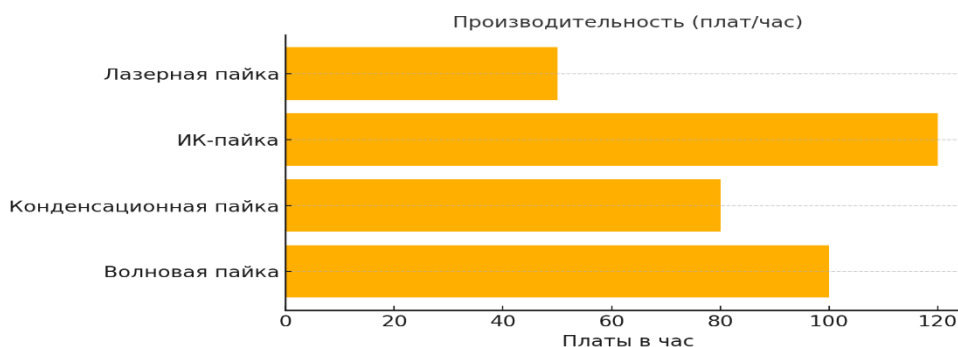


Рисунок – 19 Производительность (плата/час)

Инфракрасная пайка потребляет в среднем на 25–30% меньше энергии по сравнению с волновой пайкой. Это достигается за счёт целенаправленного нагрева компонентов ИК-излучением, без необходимости поддерживать объёмный резервуар с припоем или испарять технологические жидкости.

ИК-установки имеют меньшие теплотери, высокий КПД и позволяют точно регулировать профиль нагрева. Это важно для предприятий, ориентированных на энергосбережение и снижение издержек при массовом выпуске. Энергоэффективность (рисунок 20).

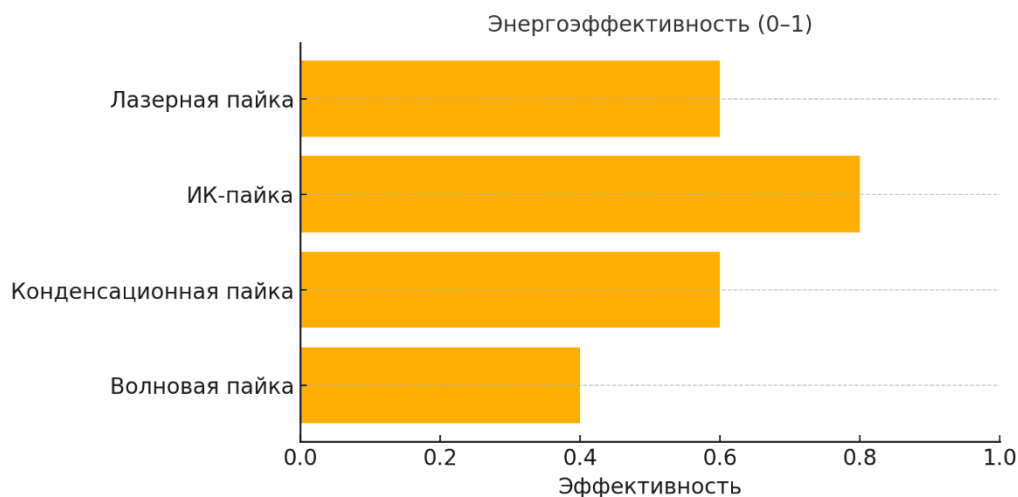


Рисунок – 20 Энергоэффективность (0-1)

«Инфракрасная пайка является одной из наиболее экологичных технологий. В отличие от волновой пайки, не требует ванн с расплавленным припоем, а в отличие от конденсационной пайки — не использует дорогостоящие и опасные химикаты» [15].

ИК-пайка практически не производит вредных выбросов и легко сочетается с применением бессвинцовых припоев. Благодаря этому она соответствует требованиям стандартов экологической безопасности (в т.ч. ISO 14001) и подходит для предприятий с политикой ESG (экологическое, социальное и корпоративное управление). График Экологичность (0-1) представлен на рисунок – 21.

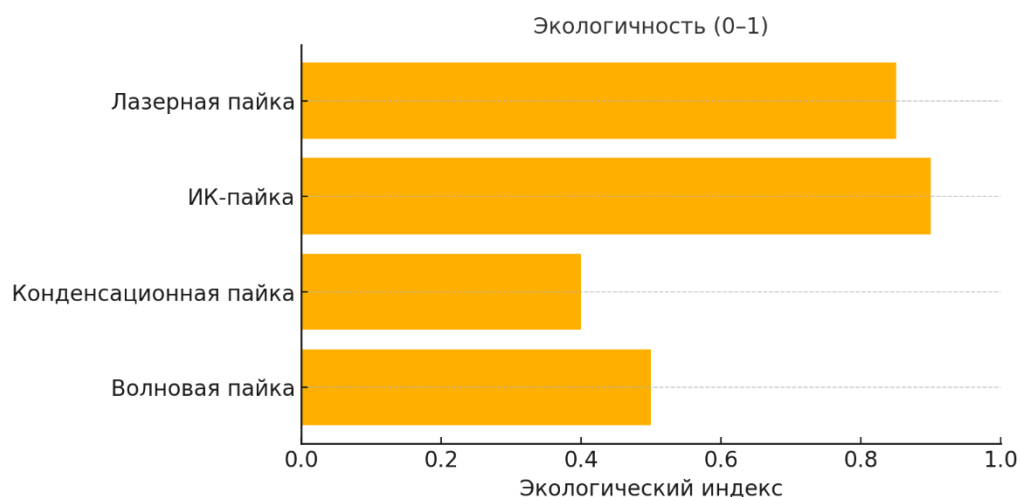


Рисунок – 21 Экологичность (0-1)

«Инфракрасная пайка — технология, которая позволяет значительно сократить расходы на оплату труда и энергию, обладает хорошей масштабируемостью и высокой степенью автоматизации. Кроме того, ИК-пайка экологична, безопасна и соответствует современным стандартам устойчивого производства, что делает её оптимальным выбором для промышленных предприятий, стремящихся к повышению экономической и экологической эффективности» [9].

4.7 Вывод по оценке экономической эффективности дипломной работы

Проведённая оценка экономической эффективности применения инфракрасной пайки (ИК-пайки) показала её значительные преимущества по сравнению с традиционными методами монтажа радиоэлектронных компонентов. Внедрение ИК-станции Т862++ позволяет значительно снизить совокупные производственные издержки за счёт:

- уменьшения затрат на оплату труда в 2 раза (с 40 000 руб. до 20 000 руб. в месяц);

- снижения потребления электроэнергии на 25% по сравнению с традиционной паяльной станцией;
- уменьшения себестоимости пайки одной платы с 50,3 руб. до 30,1 руб., что составляет экономию 20 187,5 руб. в месяц при объёме 1000 плат;
- повышения производительности одного оператора в 2 раза (с 4 до 8 плат/час), что особенно актуально для малых и средних производств;
- быстрой окупаемости капитальных вложений — приобретение ИК-оборудования окупается менее чем за 3 месяца, а годовая экономия составляет более 240 000 руб.;
- высокой энергоэффективности, важной для серийного производства с высокой нагрузкой;
- экологической безопасности и соответствия международным стандартам, таким как ISO 14001, благодаря отсутствию вредных выбросов и возможности применения бессвинцовых припоев.

ИК-пайка также демонстрирует хорошие показатели при крупносерийном производстве, обеспечивая до 120 плат в час, что выше, чем у большинства альтернативных технологий. Это делает её актуальной не только для мелкосерийных или ремонтных работ, но и для масштабируемых производственных цепочек, ориентированных на гибкость, стабильное качество и сокращение издержек.

Таким образом, инфракрасная пайка является экономически обоснованным и технологически перспективным решением, обеспечивающим рост производительности, снижение затрат и соответствие современным требованиям безопасности и экологичности. Результаты анализа подтверждают целесообразность её внедрения в рамках производственного процесса, что служит обоснованием технического выбора и основной целью дипломной работы.

Заключение

В данной выпускной квалификационной работе была рассмотрена инфракрасная пайка как один из наиболее эффективных методов монтажа электронных радиоэлементов. Проведён анализ традиционных способов пайки, изучены принципы работы инфракрасной технологии, а также оборудование и температурные профили, применяемые в процессе ИК-пайки.

На основе разработанного технологического процесса установлено, что инфракрасная пайка обладает рядом преимуществ: равномерность нагрева, высокая точность, воспроизводимость, снижение механических и термических нагрузок на компоненты. Это делает её особенно актуальной при работе с современными поверхностно-монтируемыми элементами.

Особое внимание в работе было уделено вопросам охраны труда, пожарной и экологической безопасности. Установлено, что ИК-пайка при соблюдении санитарных норм и применении соответствующих СИЗ является достаточно безопасной для оператора и окружающей среды.

В ходе экономического анализа доказана высокая эффективность внедрения инфракрасной технологии на предприятии: снижение затрат на оплату труда, энергопотребление и себестоимость, быстрая окупаемость оборудования. Полученные расчёты подтверждают целесообразность перехода на данный метод монтажа в условиях мелкосерийного производства.

Таким образом, цели и задачи дипломной работы полностью достигнуты, а разработанные технологические и организационные решения могут быть рекомендованы к применению на практике.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Бобров А. С. Пайка и технологические материалы в электронике [Электронный ресурс]. – М.: Солон-Пресс, 2021. – 168 с. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/1134993>.
2. Бояринов А. И. Организация и экономика производства РЭА [Электронный ресурс]. – М.: Дашков и К°, 2021. – 183 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/157292>.
3. Гаврилов В. Н. Технология и организация монтажа РЭА на производстве [Электронный ресурс]. – СПб.: Лань, 2018. – 296 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/131153>.
4. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [Электронный ресурс]. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200000482>.
5. ГОСТ 12.3.002-75. Процессы производственные. Общие требования безопасности [Электронный ресурс]. – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 23 с. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200001326>.
6. ГОСТ 12.4.011-89. Средства индивидуальной защиты. Общие требования и классификация [Электронный ресурс]. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200000484>.
7. ГОСТ Р 53429-2009. Печатные платы. Общие технические условия [Электронный ресурс]. – М.: Стандартиформ, 2010. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200079055>.
8. Захаров В. П. Материалы и технологии пайки электронных компонентов [Электронный ресурс]. – СПб.: Политехника, 2019. – 228 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/143487>.
9. Иванов К. А. Оценка эффективности производственных инноваций [Электронный ресурс]. – М.: Финансы и статистика, 2020. – 204 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43296777>.

10. Курганов Ю. И. Энергосбережение в промышленности: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – М.: Академия, 2017. – 192 с. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/675216>.
11. Малышев А. И., Соловьев Н. А. Монтаж и ремонт электронных приборов: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – М.: Радио и связь, 2013. – 215 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21830365>.
12. Постановление Правительства РФ от 01.12.2020 № 2464 «Об организации производственного контроля на предприятии» [Электронный ресурс] // Собр. законодательства РФ. 2020. № 50. Ст. 7940. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_369996.
13. СанПиН 1.2.3685-21. Санитарно-эпидемиологические требования к воздуху рабочей зоны [Электронный ресурс]. – М.: Минздрав России, 2021. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_380012.
14. Савельев С. А. Промышленная экология: учебник [Электронный ресурс]. – М.: Юрайт, 2022. – 432 с. – URL: <https://urait.ru/bcode/504946>.
15. Султанов И. Р. Безопасность и экологичность в производстве РЭА [Электронный ресурс]. – Казань: КНИТУ, 2019. – URL: <https://elibrary.kstu.ru/catalog/book/307890>.
16. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений [Электронный ресурс]. – М.: Госстрой РФ, 2002. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901749491>.
17. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха [Электронный ресурс]. – М.: Госстрой РФ, 2004. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901785911>.
18. Цыганков В. В. Технология монтажа и пайки радиоэлектронных средств [Электронный ресурс]. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 256 с. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/697020>.
19. Юрьев Е. В. Оборудование и технология ИК пайки: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44732825>.

20. Hwang J. Modern Solder Technology for Competitive Electronics Manufacturing [Электронный ресурс]. – New York: McGraw-Hill, 2018. – 384 p. – URL: <https://www.accessengineeringlibrary.com/book/9780071430485>.
21. Lau J. H. Reflow Soldering Processes and Troubleshooting: SMT, BGA, CSP, and Flip Chip Technologies [Электронный ресурс]. – ASM International, 2011. – 496 p. – URL: https://www.asminternational.org/materials-resources/bookstore/-/journal_content/56/10192/06180G.
22. Lee N.-C. Reflow Soldering: Processes and Troubleshooting [Электронный ресурс]. – Amsterdam: Elsevier, 2015. – 310 p. – URL: <https://www.elsevier.com/books/reflow-soldering/lee/978-1-78242-293-6>.
23. Sze S. M. Semiconductor Packaging Handbook [Электронный ресурс]. – Hoboken: Wiley, 2016. – 562 p. – URL: <https://www.wiley.com/en-us/Semiconductor+Packaging+Handbook-p-9781119064523>.
24. Wang Z. Infrared Soldering Techniques for Modern Electronics [Электронный ресурс]. – Berlin: Springer, 2020. – 217 p. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-45702-7>.