

На правах рукописи

Павлов Николай Иванович

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСА ПРОЧНОСТИ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО СОВМЕЩЕННОЙ
ТЕХНОЛОГИИ (ОЛОВЯННО-СВИНЦОВОЙ И БЕССВИНЦОВОЙ)**

Специальность 05.11.14 – Технология приборостроения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва 2012

Работа выполнена в Московском авиационном институте (Государственном техническом университете) г. Москва.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Медведев Аркадий Максимович

Официальные оппоненты:

Руфицкий Михаил Всеволодович, доктор технических наук, профессор,
Владимирский государственный университет, профессор

Нисан Антон Вячеславович, кандидат технических наук, ЗАО Предприятие Остек,
главный специалист

Ведущая организация:

ОАО «Специализированный научно-исследовательский институт
приборостроения»

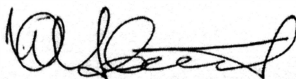
Защита диссертации состоится «12» 04 2012 г. в 14³⁰ часов на
заседании диссертационного совета Д212.141.18 в Московском государственном
техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005 г. Москва, 2-ая
Бауманская ул., д.5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «02» 03 2012 г.

Телефон для справок (499) 267-09-63

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Цветков Ю.Б.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1988086

Павлов Н.И. Исследование ре

01.03.12
2012

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Вся современная техника имеет «электронную начинку», основой которой в большинстве случаев является электронный узел, выполненный на печатной плате с паяными электронными компонентами. Для техники ответственного назначения (специального, военного, аэрокосмического, медицинского и других назначений) одной из базовых характеристик является надежность функционирования. Задача любого производства – изготовить изделия с заданным уровнем надежности, обеспечив этот уровень специальной технологией изготовления. Задача конструкторов и разработчиков – технологически обеспечить надежность изделия в приемлемых условиях производства.

Учитывая сложившуюся в последние десятилетия неизбежную зависимость отечественной электроники от зарубежной элементной базы, российские предприятия вынуждены принимать во внимание технологические особенности элементов, печатных плат (ПП) и некоторых других составляющих паяного соединения при производстве изделий ответственного назначения. В 2006 году за рубежом вступила в силу Директива RoHS, по которой вся массовая продукция электроники должна изготавливаться по бессвинцовой технологии. Это крутое изменение технологии пайки обуславливается соображениями экологической безопасности производства и утилизации отработанных продуктов массового потребления. Тем не менее, Директива RoHS не рекомендует переход на бессвинцовые технологии изделий ответственного назначения, оставляя для них традиционные технологии пайки оловянно-свинцовыми припоями. Для этой доли рынка рекомендуется заключать договора с производителями компонентов по производству партий компонентов применительно к условиям традиционной технологии пайки. За рубежом, где массовое производство электроники имеет большие объемы, доля компонентов для спецтехники составляет всего 3%. Производителям компонентов не выгодно перестраивать свое производство под такие малые объемы продукции. Поэтому они изготавливают компоненты, пригодные для обеих технологий, где это возможно. Тем не менее, часть многовыводных компонентов с матрицей выводов (например, BGA-корпуса) имеют свою специфику, не позволяющую такую универсальность применения технологий пайки. Эти компоненты изготавливают по спецзаказу применительно к требованиям традиционных технологий пайки оловянно-свинцовыми припоями. Однако для отечественной электроники это совершенно невозможно, так как в любом договоре на поставку компонентов срабатывает механизм эмбарго - производитель компонентов требует четко определить, для каких целей они в дальнейшем будут использованы. В подавляющем большинстве случаев отечественные производители вынуждены использовать компоненты промышленного исполнения, предназначенные для пайки по бессвинцовым технологиям. Вместе с тем, в отечественных разработках используются и отечественные компоненты, доля которых составляет от 10 до 30 %. Эти

компоненты производятся применительно к традиционной оловянно-свинцовой технологии пайки.

В результате производство электронных изделий специального назначения сталкивается с проблемой, по которой на одном печатном узле находятся электронные компоненты, предназначенные для разных технологий пайки, отличающихся в первую очередь разными температурными режимами пайки. В связи с этим встаёт вопрос о совместимости режимов пайки разнородных компонентов в одном печатном узле в сочетании с технологическим обеспечением надёжности аппаратуры специального назначения.

Исходя из сложности монтируемого устройства, а также из требований смешанной технологии, требующей пайку бессвинцовых компонентов проводить по бессвинцовым температурным профилям, возникает сложная задача монтажа. Требуется гарантированно провести качественную пайку, обладающую высокой надёжностью, не повредив ни монтажное основание, ни сам компонент. Приходится учитывать, что все элементы паяного соединения имеют различные коэффициенты температурного расширения, по-разному реагируют на градиенты нарастания и спада температур.

Требуется не просто обеспечить качественную пайку, но и гарантировать её надёжность на весь срок эксплуатации изделия. В связи с небольшим сроком внедрения бессвинцовой и смешанной технологии большого опыта и статистики по поведению пайки с течением времени нет (к примеру, на оловянно-свинцовое паяное соединения гарантированный срок службы – 15 лет). Проводимые экспериментальные работы позволяют провести эквивалентный пересчет влияющих параметров в соответствии с уравнением Аррениуса и провести ускоренные испытания на старение имитирующие такой срок службы. Для реального производства проводить такие испытания на все изделия невозможно. Требуется математическая модель, которая, учитывая основные влияющие факторы формирования паяного соединения, позволит дать оценку надёжности такого соединения.

В диссертационной работе рассматриваются возможные подходы к решению проблемы совместимости технологий пайки с оценкой уровня надёжности паяных соединений. Этим обусловлена ее актуальность для отечественного производства электронных изделий специального назначения.

В России этой проблемой занимался коллективы специалистов ОАО «Авангард» (Иванов Н.Н., Ивин В.Д.), ВНИИА им. Н.Л. Духова (Егоров Л.Н.), ЗАО Предприятие Остек (Ефремов А.А., Нисан А.В. и др.), ОАО «Спарта», ряд предприятий в инициативном порядке в объеме собственных производств (ОАО «НИЦЭВТ», ФГУП НИИ «Аргон», ЗАО КБ «НАВИС», ЗАО НТЦ «Модуль», КБ Корунд-М и др.).

Из исследований в этой области за рубежом можно выделить работы: проф. М. Новоттника (M. Nowottnick, Ростоцкий Университет, Германия), Вернера Энгельмайера (Werner Engelmaier, независимый эксперт, США), Ларса Гуннара Кланга (Lars-Gunnar Klang, независимый эксперт, Норвегия).

Цель и задачи работы

Основной целью диссертационной работы явилась разработка технологии пайки электронных компонентов на печатной плате, отличающейся технологическим обеспечением высокого уровня надежности электронных модулей (печатных узлов) аппаратуры специального назначения.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. проведен анализ технологических принципов создания смешанной технологии пайки разнородных электронных компонентов за единый цикл нагрева;
2. предложена технология пайки разнородных компонентов;
3. проведена экспериментальная отработка предложенной технологии и подтверждена ее состоятельность;
4. проведен анализ математической модели Уайлда-Энгельмайера для расчета надежности паяных соединений, направленный на определение ее достаточности для паяных соединений, выполненных по смешанной технологии пайки разнородных компонентов;
5. определен перечень дополнительных факторов, которые необходимо учесть в модели Уайлда-Энгельмайера для ее уточнения;
6. предложены изменения в модели Уайлда-Энгельмайера для прогнозирования надежности паяных соединений, выполненных по смешанной технологии пайки;
7. проведен ряд испытаний, подтвердивших надежность полученных паяных соединений и соответствие их прочности модернизированной математической модели Уайлда-Энгельмайера.

Объекты и методы исследований

Объектом исследований явились экспериментальные печатные платы, на которые был произведен монтаж компонентов с последующим проведением испытаний и контроля паяных соединений. Методологическую основу диссертационной работы составляют общенаучные методы познания, такие как научная абстракция, анализ и синтез, системный и структурный подходы, а также математическое моделирование. В исследовании применялись методы математического анализа, предметно-логического и структурно-функционального анализа.

Научная новизна работы

1. Разработана уточненная технология пайки электронных модулей, учитывающая разнородность электронных компонентов.
2. Впервые предложено уточнение модели расчета надежности паяных соединений Уайлда-Энгельмайера, позволяющее учитывать не только тип припоя, финишных покрытий компонентов и ПП, но также температуру, длительность проведения пайки, геометрические размеры паяного соединения и другие влияющие характеристики при использовании смешанной технологии.

3. Проведен систематический анализ конструктивных и технологических особенностей изготовления электронных изделий по смешанной технологии, результаты которого включены в созданную модель.

4. Подтверждена состоятельность созданной математической модели для прогноза надежности паяных соединений, выполненных по смешанной технологии.

5. Впервые оценен положительный результат применения смешанной технологии при монтаже не только на автоматизированных линиях, но и при применении ручного монтажа в комбинации с автоматизированной пайкой.

Полученные в процессе исследования результаты, разработанный теоретический и методологический аппарат вносят определенный вклад в изучение и прогнозирование надежности паяных соединений.

Степень достоверности полученных результатов основывается на проведенном комплексном анализе результатов теоретических данных и экспериментального исследования. Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации обоснованы теоретическими решениями и экспериментальными данными и не противоречат известным положениям.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Технология пайки разнородных компонентов в составе одного электронного модуля – смешанная технология пайки «бессвинцовых компонентов» оловянно-свинцовыми припоями.

2. Уточненная и дополненная математическая модель прогнозирования надежности паяных соединений, выполненных по смешанной технологии.

3. Результаты испытаний, подтвердивших состоятельность разработанной технологии пайки и состоятельность математической модели прогнозирования надежности паяных соединений, выполненных по смешанной технологии.

Практическая значимость

В диссертационной работе показана возможность проведения монтажа электронных модулей (печатных узлов) для специальной техники по смешанной технологии. На основе имеющихся практических работ проведена оценка требуемых изменений технологических параметров процессов пайки и монтажа, контроля и диагностики при переходе на смешанную технологию.

Содержащиеся в диссертационной работе теоретические модели позволяют на этапах проектирования и отработки изделий производить математическое моделирование надежности паяных соединений модулей без проведения дополнительных испытаний на старение. Это позволяет значительно сокращать как время оценки (по сравнению с проведением натурных испытаний), так и ресурсы на проведение испытаний (одним из базовых преимуществ является отсутствие в необходимости изготовлении дополнительного изделия для проведения натурных испытаний).

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты выполненной работы используются в ЗАО НТЦ «Модуль» г. Москва, при проектировании изделий (для оценки предполагаемой надежности, сроков службы изделий) а так же при технологической подготовке изделий к запуску в производство и непосредственно при производстве изделий. Указанные рекомендации используются технологами и монтажниками при проведении операций монтажа ответственных изделий специальной техники.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались автором и обсуждались на международном семинаре «Исследование ресурса прочности паяных соединений», проходившем в г. Росток (Германия) в мае 2010 года; Научно-практической конференции студентов и молодых ученых МАИ «Инновации в авиации и космонавтике-2010», публиковались в сборнике «Актуальные достижения европейской науки» номер тома 42.

Публикации. Тема и содержание диссертации отражены в 8 научных работах (статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ – 4, статей в журналах – 2, статей в научных сборниках – 2).

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследования, дополнению имеющихся алгоритмов моделирования и математической модели расчета надежности паяного соединения. Автором предложены технологические приемы и режимы монтажа смешанных паяных соединений. Проведены экспериментальные работы по монтажу ЭРИ, контролю паяных соединений и анализу полученных результатов. Обсуждение и анализ полученных теоретических и экспериментальных результатов проводились совместно с научным руководителем. Основные выводы по проведенной работе сформулированы автором.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, кратко охарактеризованы научная и практическая значимость результатов работы, их апробация, указаны теоретическая и методологическая основа исследования, приведены сведения о расположении материала по разделам работы.

В **первой главе** рассмотрен технологический процесс пайки, его особенности и критерии с точки зрения надежности.

В основе современных изделий вычислительной и измерительной техники лежат модули и изделия, выполненные на печатной плате, с установленными на неё ЭРИ. Установка производится, в большинстве случаев, при помощи пайки. Рассмотрены общефизические основы паяного соединения, а так же его преимущества и недостатки. Даны технологические аспекты процесса, предшествующего непосредственно процессу оплавления. Приведены все составляющие паяного соединения: ПП (включая составляющие самой печатной платы), припой, элемент и их влияние на формирование паяного соединения. Освещен вопрос формирования интерметаллического соединения и его свойств при оценке надежности паяного соединения.

Рассмотрен вопрос перехода на бессвинцовую технологию и требования, предъявляемые к технологическому процессу (изменение материалов, параметров процесса, оборудования и т.д.) при переходе. Показаны возможные дефекты, которые могут возникать при изменениях в технологическом процессе.

Также рассмотрены требования, предъявляемые к современным разработкам не только с точки зрения технологии, но и с точки зрения последних конструктивных и схмотехнических разработок. Приведены аспекты применения сложных компонентов, разводки ПП, изготовления ПП, аспекты миниатюризации и усложнения, с учетом применения бессвинцовой и смешанной технологии.

Отдельно освещены наиболее «проблемные» вопросы бессвинцовой технологии – оловянная чума и оловянные усы: причины возникновения, свойства и характеристики.

Во **второй главе** рассмотрена математическая модель для расчета надежности паяных соединений. Исходя из необходимости оценки надежности изделия, есть два пути – проводить ускоренные испытания на старение, имитирующие работу прибора на протяжении заданного времени и для выявления дефектов на этапе приработки (см. рисунок 1). Для пересчета параметров испытаний используют уравнение Аррениуса, в основном такой эффект достигают увеличивая температуру, при которой проводят испытания. Для ЭРИ испытания при +125 °С в течение 16 часов эквивалентны 2 годам работы. Срок в 2 года обусловлен тем, что для ЭРИ это время и есть время «детской смертности» (или

временем отказов нулевого уровня). Для готовых изделий 15 лет на орбите эквивалентны работе изделия (в металле) в течение 300 часов при +45 °С.

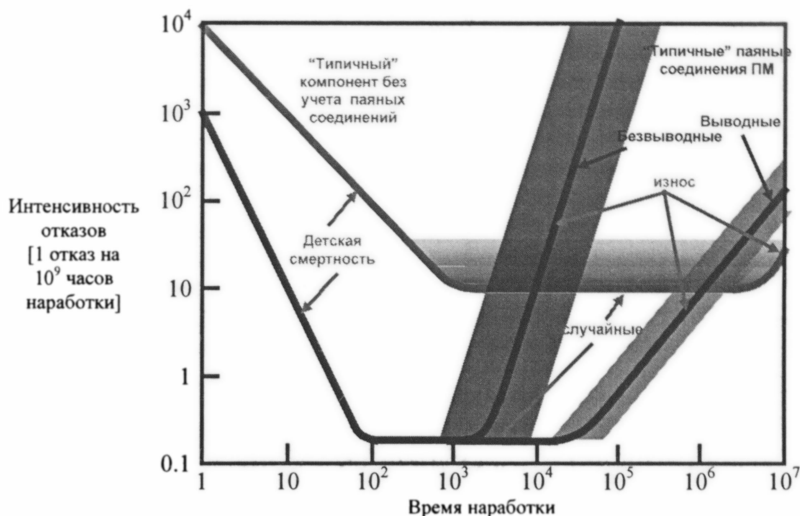


Рисунок 1

Второй путь – использовать математическую модель, оценивающую надежность паяного соединения исходя из ряда влияющих критериев. При этом требуется использовать модель, учитывающую многие характеристики паяного соединения, такие как:

- геометрические размеры паяного соединения или его площадь;
- материал основания ПП;
- финишное покрытие ПП;
- материал ЭРИ;
- финишное покрытие выводов ЭРИ;
- тип припоя;
- температура плавления припоя;
- средняя температура паяного соединения;
- время пайки.

При этом важно учитывать характеристики материалов самой ПП, такие как:

- температура стеклования (T_g);
- температура разложения (T_d);
- температурный коэффициент расширения по оси Z (Z-CTE);
- время расслоения (t_d);
- изменения адгезии меди;

- надёжность многослойных плат;
- стоимость.

Исходя из всех вышеописанных факторов в течение длительного времени, для прогнозирования надёжности паяного соединения, применяется уравнение Энгельмайера-Уайльда. Данное уравнение (см. формулы 1-8) учитывает достаточно большой ряд характеристик, описывающих большинство критичных факторов, сильно влияющих на формирование паяных соединений.

Непосредственно критерий надёжности, в соответствии с которым определяется, надёжна система или нет для безвыводных и выводных компонентов, имеет вид:

$$N_f = \frac{1}{2} \left[\frac{2\varepsilon'_f}{\Delta D} \right]^m,$$

$$\frac{1}{m} = 0,442 + 6 \times 10^{-4} \bar{T}_{SJ} - 1,74 \times 10^{-2} \ln \left(1 + \frac{360}{t_D} \right),$$

$$\Delta D(\text{безвыводные}) = \left[\frac{FL_D \Delta \alpha \Delta T_e}{h} \right],$$

$$\Delta D(\text{выводные}) = \left[\frac{FK_D (L_D \Delta \alpha \Delta T_e)^2}{(133 \text{ psi}) Ah} \right],$$

$$\Delta T_e = \left| \frac{\alpha_1 \Delta T_1 - \alpha_2 \Delta T_2}{\Delta \alpha} \right|,$$

где:

$$133 \text{ psi} = 919 \text{ кПа}$$

$2\varepsilon'_f$ – коэффициент, зависящий от типа припоя;

ΔD – оценка циклического повреждения;

$\bar{T}_{SJ}$ – средняя температура паяного соединения;

t_D – время выдержки в полупериоде в минутах;

F – коэффициент, зависящий от типа компонента

(для безвыводных компонентов $F = 1,5 \div 1,0$;

для безвыводного компонента с галтелью $F = 1,2 \div 0,7$;

для выводного компонента $F = 1,0$);

L_D – максимальное расстояние от нейтральной точки;

$\Delta \alpha$ – разность коэффициентов ТКЛР;

h – высота паяного соединения, для выводных компонентов принимается равной $\frac{1}{2}$ толщины трафарета;

KD – диагональная жесткость вывода на изгиб;

A – эффективная площадь паяного соединения.

Приведенные формулы вычислены и используются для эвтектического припоя типа ПОС-61.

Суммарная вероятность отказа системы после N циклов:

$$F_{\Sigma}(N) = 1 - \exp \left\{ Ln(1 - 0,01x) \sum_{i=1}^i n_i \left[\sum_{j=1}^j \frac{N_{i,j}}{N_{f,i,j}(x\%)} \right]^{\beta_i} \right\},$$

где:

- n_i – число i-х компонентов;
- β_i – параметр формы кривой распределения Вейбулла для паяных соединений i-го компонента поверхностного монтажа;
- $N_{i,j}$ – число циклов, которым подвергается i-й компонент на j-ом уровне нагрузки;
- $N_{f,i,j}$ – усталостная долговечность паяного соединения i-го компонента поверхностного монтажа на j-м уровне нагрузки к суммарной вероятности отказа x%.

Критерий надежности

Для безвыводных поверхностно-монтируемых компонентов:

$$FM(rel, ll) = \frac{2\varepsilon'_f}{F} \frac{h(2N)^c}{L_D \Delta \alpha \Delta T_e} \left[\frac{\lambda n(0,5)}{\lambda n(1 - 0,01x)} \right]^{\frac{c}{\beta}}.$$

Для выводных поверхностно-монтируемых компонентов:

$$FM(rel, ld) = \frac{2\varepsilon'_f (133 psi) Ah(2N)^c}{F K_D (L_D \Delta \alpha \Delta T_e)^2} \left[\frac{\lambda n(0,5)}{\lambda n(1 - 0,01x)} \right]^{\frac{c}{\beta}}.$$

Критерий: если $FM(rel) \geq 1,0$ изделие годно, если $FM(rel) < 0,7$ изделие негодно.

Для бессвинцовой технологии и припоев типа SAC предложены следующие модели Энгельмайера-Уайльда:

$$N_f(50\%) = \frac{1}{2} \left[\frac{0,48}{\Delta D} \right]^m,$$

$$\frac{1}{m} = 0,390 + 9,3 \times 10^{-4} \bar{T}_{sj} - 1,92 \times 10^{-2} \ln \left(1 + \frac{100}{t_D} \right).$$

Для смешанной технологии при применении припоев типа ПОС и ЭРИ имеющих бессвинцовое покрытие предложена следующая модель Энгельмайера-Уайльда:

$$N_f(50\%) = \frac{1}{2} \left[\frac{0,56}{\Delta D} \right]^m, \quad (1)$$

$$\frac{1}{m} = 0,410 + 8,7 \times 10^{-4} \bar{T}_{sj} - 1,86 \times 10^{-2} \ln \left(1 + \frac{240}{t_D} \right). \quad (2)$$

Алгоритм расчета надежности с учетом применения новой модели определения надежности смешанных паяных соединений: предположим, что использовалось 32 тестовые группы паяных соединений исследуемого компонента, и термоциклирование было остановлено после отказа 17-й группы паяных соединений. Порядок расчета для оценки надежности паяных соединений в условиях эксплуатации приведен ниже.

1. Рассчитать число испытательных циклов при вероятности отказа 50% для группы паяных соединений для условий испытаний:

$$N'_{f,g}(50) = \frac{n_{16} + n_{17}}{2},$$

где n_{16} – число циклов до наступления 16-го отказа,

n_{17} – число циклов до наступления 17-го отказа.

2. Рассчитать число испытательных циклов при вероятности отказа 50% для всех паяных соединений одного компонента для условий испытаний:

$$N'_f(50) = N'_{f,g}(50) \left(\frac{1}{m} \right)^{\frac{1}{\beta}}.$$

3. Провести расчет ряда параметров для условий испытаний:

- 3.1. Рассчитать абсолютную разность коэффициентов теплового расширения компонента и подложки:

$$\Delta \alpha' = \alpha'_s - \alpha'_c.$$

- 3.2. Рассчитать амплитуду циклических колебаний температуры компонента:

$$\Delta T'_c = T'_c - T'_{c,0}.$$

- 3.3. Рассчитать амплитуду циклических колебаний температуры подложки (в области компонента):

$$\Delta T'_s = T'_s - T'_{s,0}.$$

- 3.4. Рассчитать среднюю температуру паяного соединения в цикле:

$$T'_{sj} = \frac{T'_c + T'_s + T'_{c,0} + T'_{s,0}}{4}.$$

- 3.5. Рассчитать эквивалентную амплитуду циклических колебаний температуры, вызывающая диссипацию энергии в компоненте, а также колебания внешней температуры компонента ($\Delta \alpha' \neq 0$, $\Delta \alpha'_s \neq 0$):

$$\Delta T'_e = \frac{\alpha'_s \Delta T'_s - \alpha'_c \Delta T'_c}{\Delta \alpha'}.$$

- 3.6. Рассчитать показатель усталостной пластичности:

$$c' = -0,410 - 8,7 \cdot 10^{-4} T'_{sj} + 1,86 \cdot 10^{-2} \ln \left(1 + \frac{240}{t'_D} \right).$$

4. Провести расчет ряда параметров для условий эксплуатации. Порядок расчета и формулы идентичны приведенным в пункте 3, только все обозначения параметров с верхним индексом «'»
5. Рассчитать количество эксплуатационных циклов до отказа с вероятностью 50%:

для безвыводных соединений поверхностного монтажа:

$$N_f(50) = \frac{1}{2} \left[(2N'_f(50))^{\frac{1}{\beta}} \frac{\Delta\alpha\Delta T_e}{\Delta\alpha' \Delta T'_e} \right]^{\frac{1}{\beta}};$$

для соединений поверхностного монтажа компонентов с выводами:

$$N_f(50) = \frac{1}{2} \left[(2N'_f(50))^{\frac{1}{\beta}} \left(\frac{\Delta\alpha\Delta T_e}{\Delta\alpha' \Delta T'_e} \right)^2 \right]^{\frac{1}{\beta}};$$

6. Рассчитать количество эксплуатационных циклов до отказа с заданной вероятностью x %:

$$N_f(x) = N_f(50) \left(\frac{\ln(1-0.01x)}{\ln(1-0.01 \cdot 50)} \right)^{\frac{1}{\beta}}.$$

7. При необходимости можно рассчитать вероятность отказа (в %) в течение заданного времени T в условиях эксплуатации:

$$q = 100 \cdot \left(1 - \exp \left(\left(\frac{T/t}{N_f(50)} \right)^{\beta} \ln(1-0.01 \cdot 50) \right) \right)$$

и вероятность безотказной работы (в %):

$$p = 100 - q,$$

где N – количество эксплуатационных циклов,

t – длительность одного цикла.

В третьей главе рассмотрены вопросы пайки и монтажа компонентов при использовании смешанной технологии. В таком процессе проводится пайка и монтаж бессвинцовых и свинцовосодержащих компонентов в одном цикле. Монтаж должен осуществляться исключительно свинцовосодержащими пастами и припоями. При этом для формирования качественного паяного соединения пиковая температура пайки должна соответствовать пиковой температуре бессвинцовой технологии монтажа, чтобы гарантировать полное растворение в припое финишного покрытия выводов и образования качественного интерметаллического соединения.

Подробно рассмотрен процесс пайки оплавлением. Описан каждый из этапов нагрева платы при конвекционном оплавлении:

- этап предварительного нагрева;
- этап активации флюса;
- этап оплавления припойной пасты;
- этап контролируемого охлаждения.

ОТЛИЧИЯ.

В главе рассмотрены реальные температурные профили (см. рисунок 2) и приведены рекомендации по их снятию и построению, исходя из конструкционных особенностей и сложности паяемых модулей.

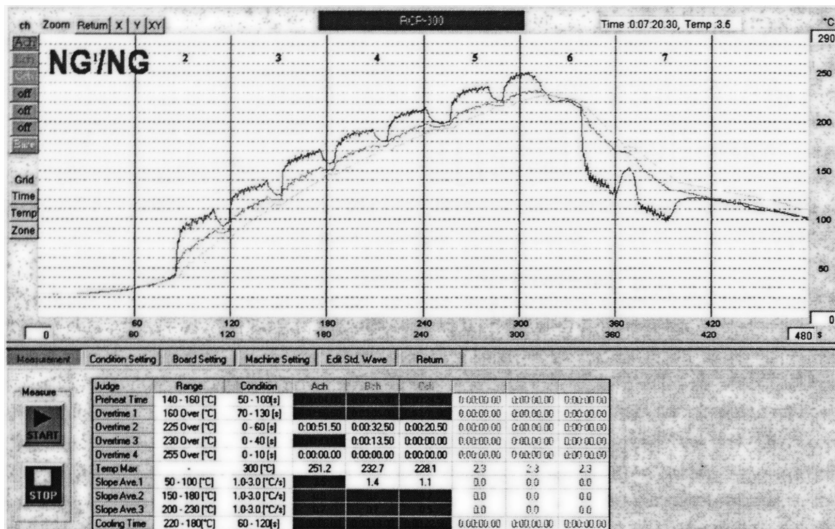


Рисунок 2

Обобщены и представлены к рассмотрению доступные результаты экспериментальных работ. Проведен анализ матрицы комбинаций материал ПП – финишное покрытие ПП – припой – компонент. Приведены технические характеристики испытываемых ПП, применяемой элементной базы и припоев. Получены данные по отказам активных и пассивных элементов, выполненных по разным технологиям (классической – свинцовой, бессвинцовой и смешанной). Также описан объем проверок после проведения автоматизированного монтажа, при:

- НКУ (контрольная группа);
- после воздействия повышенной температуры $+85^{\circ}\text{C}$;
- после воздействия медленных термических циклов (минус 65°C – $+125^{\circ}\text{C}$);
- после термошока, производимого методом переноса (минус 65°C – $+125^{\circ}\text{C}$);
- после проведения механических испытаний – синусоидальной широкополосной вибрации 30 г 1-2000 Гц и ударов 150 г. [16]

Данные работы, в объеме представленном на семинарах и опубликованных частях, выявили закономерность, позволяющую говорить о возможности

применения смешанной технологии и возможности пайки микросхем в BGA корпусах оловянно-свинцовыми припоями. Представлены недостатки этих работ.

Отдельно в третьей главе описаны новые и перспективные виды компонентной базы, требующие дополнительных изменений в технологии пайки и монтажа подобных модулей.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальной работы. Был проведен монтаж штыревых и поверхностно-монтируемых компонентов на автоматизированном оборудовании и демонтаж вручную. В качестве ПП были применены реально используемые в изделиях многослойных ПП и рельефных ПП. На данные ПП были установлены следующие компоненты:

- микросхема Л1879ВМ4 (производства ЗАО НТЦ «Модуль») в корпусе BGA576, пластик, припой шариков бессвинцовый;
- микросхема 1879ХК1 (производства ЗАО НТЦ «Модуль») в корпусе BGA484, пластик, припой шариков бессвинцовый;
- микросхема FM18L08-70-SG (производства Ramtron, Ind) в корпусе 28 SOIC, пластик, припой выводов бессвинцовый;
- микросхема LTC6652АНМС8-2.5 #PBF в корпусе 28 SOIC, пластик, припой выводов бессвинцовый;
- микросхема LT1114 #PBF в корпусе Ceramic Dip, припой выводов бессвинцовый;
- ЧИП компоненты, припой выводов бессвинцовый, пайка свинцовая.

Монтаж микросхем в BGA-корпусах был проведен в автоматическом режиме с оплавлением в конвекционной конвейерной печи ERSА HOTFLOW. Пассивные компоненты, микросхемы в планарных корпусах с выводами типа «крыло чайки» и штырьковыми выводами были запаяны вручную с применением станции RАСЕ при температуре 260 °С и длительности пайки одного вывода не более 3 секунд.

Платы с установленными компонентами были проверены визуально и проконтролированы (с помощью систем визуального контроля ПУ VS8 и «Ersascope», микроскопа МБС-10), отечественные микросхемы проверены на функционирование. Проверка проводилась на соответствие требованиям ОСТ 92-1042-98, IPC-A-610D, IPC-J-STD-001D, а так же ТИ и ТП контроля пайки.

В дальнейшем ПП с установленными ЭРИ проверяются после проведения ускоренных климатических испытаний, в объем данных испытаний так же включены и термовакуумные испытания.

При проверке не выявлено замечаний, паяные соединения удовлетворяют следующим требованиям:

- пайки блестящие, без темных пятен, трещин, раковин, острых выпуклостей и посторонних включений;
- на ряде выводов поверхность припоя матовая или блестящая с матовыми пятнами, что допускается и соответствует требованиям стандартов.

При визуальном контроле отсутствовали дефекты, характерные для бессвинцовых соединений: шероховатая поверхность (зернистая или матовая),

отсутствовали процессы коррозии, роста «оловянных усов»; не наблюдались расслоения, трещины и разрывы в паяных соединениях, корпусах ЭРИ.

Так же был проведен разрушающий контроль – микрошлифирование образцов с дальнейшим анализом паяного соединения. Контроль показал, что внешний вид паяных соединений удовлетворяет требованиям стандартов и может быть охарактеризован как удовлетворительный. На микрошлифах видно, что паянное соединение имеет равномерную структуру, отсутствуют трещины, расслоения, полости. С точки зрения надежности пайки и монтажа, паяное соединение выполнено качественно и замечаний не имеет.

В заключении сформулированы основные результаты проведенных исследований.

В приложениях представлены:

- протоколы исследований;
- чертежи ПП.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе производственного опыта и экспериментальных исследований в математической модели анализа надежности паяных соединений Уайлда-Энгельмайера скорректированы весовые коэффициенты температуры и времени пайки, вида припоя и оценки циклического повреждения, позволяющие рассчитывать надежность смешанных паяных соединений для штыревого и поверхностного монтажа как при ручном, так и автоматизированном монтаже.
2. Обосновано введение в процесс технологической подготовки производства широкого спектра изделий обязательного предварительного термопрофилирования. При термопрофилировании в основу положен температурный профиль пайки как для бессвинцовой технологии (при наличии элементов выполненных по бессвинцовой технологии) с учетом применения компонентов в малых корпусах с ограниченными градиентами нарастания и спада температур. Рекомендуется проводить анализ новых типов компонентов в технических описаниях, на которые задаются ограничения по градиентам нарастания и спада температур.
3. По результатам экспериментальной апробации предложенной технологии пайки и монтажа рекомендовано проводить не только предварительную сушку печатных плат и элементов, но и выдержку смонтированных изделий в течение не менее 50 минут после процесса оплавления для минимизации термомеханических напряжений.
4. Показано, что надежность смешанного паяного соединения, выполненного по предложенной технологии, не уступает надежности классического (свинцового) паяного соединения. Оценка надежности проводилась на основе ускоренных испытаний на старение, базирующихся на законе Аррениуса, с заданным сроком эксплуатации изделий не менее 15 лет, включая термовакуумные испытания и последующий неразрушающий и разрушающий контроль.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Павлов Н.И. Проблемы надежности паяных соединений в изделиях специальной техники // Научно-технический журнал «Надежность».-2010.-№2 (33).- С. 58-62.
2. Павлов Н.И. Составляющие паяного соединения. Свойства и характеристики // Научно-технический журнал «Электроника: наука, технология, бизнес».-2011.-№5 (111).- С. 148-154.
3. Павлов Н.И. Бессвинцовые компоненты в аппаратуре ответственного назначения // Научно-технический журнал «Электроника: наука, технология, бизнес».-2011.-№6 (112).- С. 142-146.
4. Павлов Н.И., Фролкова, Н.О. Инженерное обеспечение производства печатных плат и дефектность продукции// Научно-технический журнал «Электроника: наука, технология, бизнес».-2011.-№7 (113).- С. 142-147.
5. Павлов Н.И. Анализ причин возникновения дефектов «надгробного камня» при использовании компонентов типоразмера 0201 // Журнал «Технологии в электронной промышленности».-2008.-№1.- С. 62-67.
6. Павлов Н.И. Проблемы бессвинцовой пайки. Международный форум «Ассолд 2008» // Журнал «Компоненты и технологии».-2009.-№2.- С. 120-128.
7. Павлов Н.И. Исследование ресурса прочности паяных соединений // Международный технологический семинар по современным технологиям.- Германия.- Росток.- 2009 - 200 с. (1 пл.).
8. Павлов Н.И. Исследование ресурса прочности паяных соединений электронных модулей, выполненных по совмещенной технологии (свинцовой и бессвинцовой) // Материалы научно-практической конференции студентов и молодых ученых МАИ «Инновации в авиации и космонавтике», 2010.- С. 73.
9. Медведев А.М., Павлов Н.И. Модели усталостных разрушений паяных соединений // Актуальные достижения европейской науки, 2011.- Том 42, - С. 33-38.