

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(институт)

Сварка и обработка материалов давлением и родственные процессы

(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

СОМДиРП

В.В. Ельцов

(И.О.Фамилия)

(подпись)

« ___ » _____ 2016г

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Волков Антон Алексеевич

(Фамилия, Имя, Отчество студента)

22.04.01. Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки)

Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических
материалов

(наименование магистерской программы)

Форма обучения Очная Группа МТМм-1401

Научный руководитель Б.Н. Перевезенцев

Консультанты _____

Тема магистерской
диссертации Бессвинцовые припои на основе олова

Руководитель магистерской программы

А.И. Ковтунов

(И.О. Фамилия)

(подпись)

« ___ » _____ 2016г.

Тольятти 2016

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

«Тольяттинский государственный

Институт Машиностроения

(институт, факультет)

«Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой СОМДиРП

В.В. Ельцов

(подпись)

(И.О. Фамилия)

« ____ » _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Студент Волков Антон Алексеевич

1. Тема: Бессвинцовые припои на основе олова

2. Срок сдачи студентом законченной диссертации 20 марта 2016 г.

3. Исходные данные к выполнению диссертации:

1) Литературные и патентные материалы по пайке изделий в микроэлектронике

2) Директивы ограничивающие применение свинца в технологических процессах пайки

4. Содержание диссертации

Актуальность работы.

Существует необходимость разработки бессвинцовых припоев на основе олова применительно к машиностроительной промышленности, так как там нет жестких ограничений по температуре плавления припоя в сравнении с микроэлектроникой.

Цель работы.

Целью данной диссертационной работы является создание материалов и технологий производства и применения бессвинцовых припоев на основе олова.

1. Состояние вопроса.

Анализ литературных и патентных материалов и опыта промышленности по применению бессвинцовых припоев на основе олова в технологиях пайки.

Задачи работы.

1. Определить температурно-временные режимы процесса пайки исходя из условий испарения цинка при соответствующем экранировании объема рабочего пространства контейнера.

2. Исследовать поверхностные взаимодействия паровой фазы цинка, обеспечивающие смачивание и растекание припоя по паяемой поверхности.

2. Основная часть.

Описание решения задач работы.

3. Основные результаты и выводы.

7. Дата выдачи задания « ____ » _____ 2015 г.

Научный руководитель

Б. Н. Перевезенцев

Задание принял к исполнению

А. А. Волков

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| АННОТАЦИЯ..... | 4 |
| ВВЕДЕНИЕ..... | 5 |
| 1.МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ ПРИПОЯМИ НА ОСНОВЕ ОЛОВА | 8 |
| 1.1 Бессвинцовые припои на основе олова..... | 8 |
| 1.2 Основные системы бессвинцовых припоев..... | 15 |
| 1.3 Бессвинцовые технологии | 18 |
| 1.4 Бессвинцовый припой Sn-Ag-Cu | 23 |
| 1.4.1 Анализ системы сплавов Sn/Ag/Cu | 23 |
| 1.4.2 Легирование Ge системы сплавов Sn/Ag/Cu | 27 |
| 2.ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПАЙКА ПРИПОЯМИ СИСТЕМЫ Sn-Zn..... | 36 |
| 2.1 Методика проведения исследований | 36 |
| 2.2 Температурно-временной режим | 37 |
| 2.3 Выбор паяльной атмосферы:..... | 39 |
| 2.4 Технология контейнерной пайки системы Sn-Zn | 40 |
| 2.4.1 Содержание и последовательность проведения эксперимента (в вакууме)..... | 40 |
| 2.4.2 Содержание и последовательность проведения эксперимента (в воздушной среде): | 44 |
| 2.5 Структура паяных соединений | 47 |
| 3 Безопасность и экологичность..... | 49 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 51 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ | 52 |

АННОТАЦИЯ

Применение припоя на основе олова насчитывает многовековую историю. Наиболее широко распространённой основой припоя является олово и свинец в различных концентрациях и лишь в последнее время появились нормативные документы, которые ограничивают применение свинца. Наиболее успешные достижения они получили в электронике и микроэлектронике, однако данная проблема так же существует в машиностроительной промышленности, появилась необходимость замены свинцовых припоев на бессвинцовые.

Существует необходимость разработки бессвинцовых припоев на основе олова применительно к машиностроительной промышленности, так как там нет жестких ограничений по температуре плавления припоя в сравнении с микроэлектроникой.

Диссертационная работа посвящена высокотемпературной пайке машиностроительных материалов и конструкций припоями на основе олова.

ВВЕДЕНИЕ

Оловянно-свинцовые припои применяются в самых разнообразных отраслях промышленности при низкотемпературной пайке сталей, никеля, меди и ее сплавов. Они обладают хорошими технологическими свойствами, пластичны и при процессе пайки не требуют дорогостоящего оборудования. Пайку оловянно-свинцовыми припоями производят обычно при нагреве паяльником, погружением, пайка волной припоя и т.д. В зависимости от содержания в припоях олова изменяются свойства и температура плавления. Минимальная температура плавления (183,3 °С) достигается при содержании 61,9 % Sn. Сплав при этом имеет эвтектическую структуру, весьма пластичен, обладает высокими технологическими свойствами.

В последние годы является актуальной проблема экологичности в промышленности. Начало развитию бессвинцовых технологий положила директива End-of Life Vehicle. Эта директива нацелена на то, чтобы ограничить использование четырёх основных тяжелых металлов (кадмия, свинца, ртути, шестивалентного хрома) в машинах, была утверждена парламентом ЕС в мае 2000 года и 18 сентября 2000 года она стала директивой 2000/53/ЕС.

Следующим шагом, на пути к развитию бессвинцовых технологий стала директива WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment directive). В соответствии с этой директивой, с 1 января 2004 года в Европе полностью запрещается использование свинца при производстве радиоэлектронной аппаратуры.

Третьим этапом, стала директива RoHS (под номером 2002/95/ЕС) которая, 1 июля 2006года, вступила в действие на территории Европейского союза. Цель директивы — ограничить применение опасных веществ для обеспечения защиты здоровья людей и окружающей среды.

Директива RoHS устанавливает точные пределы допустимых концентраций, соблюдение которых обязательно, в отличие, например, от некоторых других директив (в частности директивы WEEE), которые лишь рекомендуют придерживаться некоторых безопасных значений.

Данная директива распространяет своё действие не только на территорию ЕС, но и на тех производителей электронного и электрического оборудования за пределами стран ЕС, в том случае, если их продукция предназначена для стран ЕС.

Директива RoHS распространяется на следующие категории продукции:

1. торговые автоматы,
2. автомобильные радиаторы,
3. машиностроительные конструкции из сталей и сталей с другими металлами в разнородных сочетаниях,
4. лампы накаливания,
5. игрушки,
6. электрические инструменты,
7. потребительская электроника,
8. бытовая техника,
9. осветительная аппаратура
10. телекоммуникационное оборудование и оборудование информационной техники
11. товары для досуга и спортивные товары

Пределы допустимых концентраций, накладываемые директивой, связаны с вредным воздействием свинца на организм человека и в целом на экологическую обстановку.

Одним из аргументов экологов, является то, что бесконтрольная утилизация электронных узлов на свалках, приводит к тому, что свинец под действием осадков выщелачивается и попадает в подземные воды. Однако

при анализе литературных источников данное утверждение является достаточно спорным, поскольку серьезных аргументов ни защитниками, ни противниками этого запрета не приведены [3-7]. Основными же загрязнителями окружающей среды свинцом являются металлургические предприятия, выплавляющие свинец и сплавы с ним, а также бензиновые двигатели.

Существует необходимость разработки бессвинцовых припоев на основе олова применительно к машиностроительной промышленности, так как там нет жестких ограничений по температуре плавления припоя в сравнении с микроэлектроникой.

В самых разнообразных отраслях промышленности имеют место быть бессвинцовые припои, которые различаются как по свойствам, так и по цене.

Следует отметить, что в последние годы в электронике и микроэлектронике проблемы бессвинцовых припоев и технологий успешно решены.

Для различных применений разработаны припои, технологии их изготовления, новые виды оборудования позволяющие производить качественные изделия без использования свинца.

Целью данной диссертационной работы является создание материалов и технологий производства и применения бессвинцовых припоев на основе олова в связи с экологическими требованиями предъявляемыми промышленностью.

1. МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ ПРИПОЯМИ НА ОСНОВЕ ОЛОВА

1.1 Бессвинцовые припои на основе олова

Исходя из температурных условий определяемых элементной базой электроники, требований по электропроводности и прочности при разработке припоев анализировались эвтектические системы сплавов олова с медью, серебром, висмутом, цинком

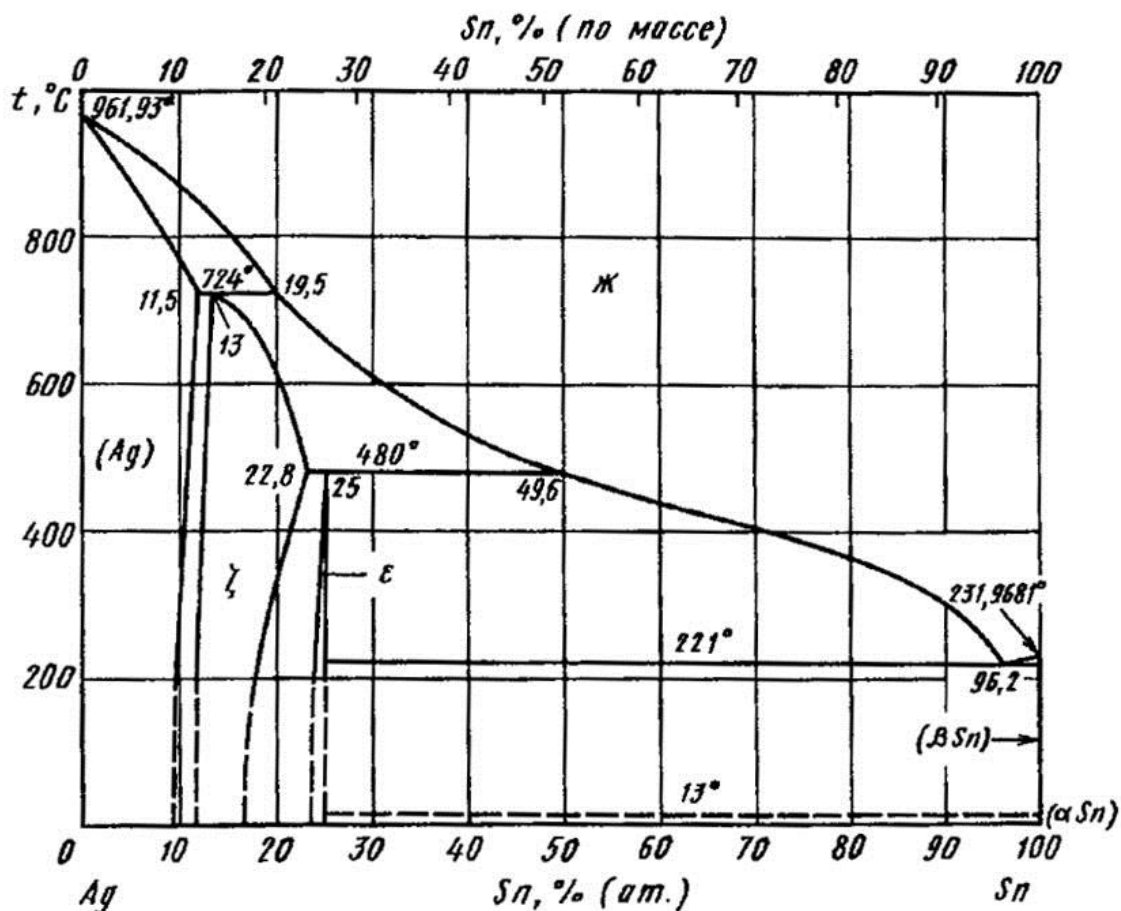


Рисунок 1 - Диаграмма состояния Sn/Ag

Сплав системы Sn-Ag (96,5Sn/3,5Ag, 221°C) (Рис.1). Имеет удовлетворительные смачиваемость, прочность и сопротивляемость термической усталости, поэтому используется в электронной промышленности. Однако, при повышенных температурах возможны повреждения, связанные с термической усталостью. Эвтектика Sn-Ag в отличие от системы Sn-Pb (содержащей в олове относительно большое

количество свинца, который при повышенной температуре из – за укрупнения зерна становится нестабильным, что увеличивает вероятность образования трещин) характеризуются ограниченной растворимостью серебра в олове. Благодаря этому сплав устойчив к появлению неоднородных структур и накоплению дислокаций, т. е. обеспечивают большую стабильность и надежность паяных соединений [8].

Сплав системы Sn-Ag-Cu (95,5Sn/4,0Ag/0,5Cu, 217 – 219 °C). Высокая температура плавления делает сплав идеальным для использования при температуре ~175 °C. Но применение его требует специального флюса с продленной активностью, выдерживающего повышенные температуры. Для улучшения смачиваемости поверхности пайку можно проводить в атмосфере азота.

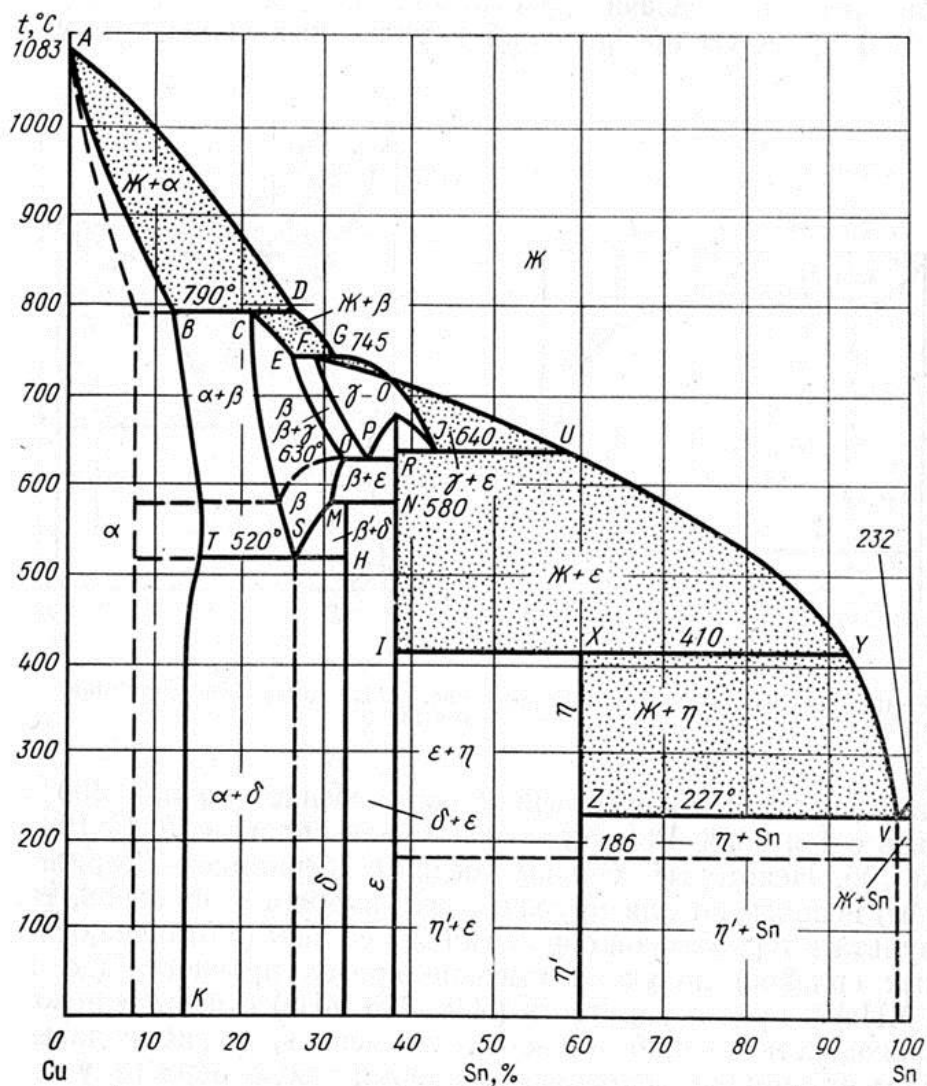


Рисунок 2 - Диаграмма состояния Sn/Cu

Сплав системы Sn-Cu (99,3Sn/0,7Cu, 227 °C) (Рис.2). Используется в высокотемпературных процессах в автомобильной промышленности. При изготовлении мобильных телефонов припой Sn-Cu обеспечивает такое же качество пайки, как и эвтектический припой Sn/Pb. Сплав может использоваться в процессах, где желательно отсутствие свинца и серебра. Предварительные испытания говорят о том, что по усталостным показателям припой превосходит Sn/Pb, однако при тестировании на текучесть уступает ему. При пайке в воздушной атмосфере смачиваемость уменьшается, и галтель имеет неровную рельефную поверхность. Имеет худшие механические свойства среди всех бессвинцовых припоев, однако он подходит для пайки волной из – за низкой стоимости [15].

Sn-Ag-Cu-Sb (96,2Sn/2,5Ag/0,8Cu/0,5Sb, известен как Castin, 217 – 220 °C). По механическим свойствам и надежности сопоставим с Sn/Ag/Cu, но содержит сурьму, которая относится к токсичным металлам.

Sn-Ag-Bi (91,8Sn/3,4Ag/4,8Bi, 200 – 216 °C). Добавление висмута снижает $T_{пл}$ и повышает твердость сплава. Сплав разработан и испытан в Сандийской национальной лаборатории. Кроме того, сплав прошел испытания на совместимость с органическими покрытиями, предназначенными для защиты медных дорожек и сквозных отверстий при пайку. NCMS рекомендует использовать сплав при температуре 160 – 175 °C. Важная особенность сплава в случае присутствия свинца на плате или в покрытии выводов компонентов формируется соединение Sn/Bi/Pb, $T_{пл}$ которого 96 °C, т. е. сплав можно применять только в полностью бессвинцовом процессе, иначе он становится легкоплавким и надежность паяного соединения существенно снижается.

Sn-Ag-Bi-Cu (90Sn/2,0Ag/7,5Bi/0,5Cu, 198 – 212 °C). При содержании висмута более 5% наблюдается небольшой пик плавления вблизи $T_{пл}$ эвтектики Sn/Bi (138 °C). Для припоя с содержанием висмута 7,5% пик приходится на 1% от объема всего расплава. Такое количество расплавленной эвтектики оказывает непредсказуемое влияние на надежность соединения. В случае присутствия свинца на плате комбинация его с припоем приводит к образованию соединений Sn-Pb-Bi, которые плавятся уже при 96 °C, вследствие чего сплав не самая лучшая альтернатива Sn-Pb.

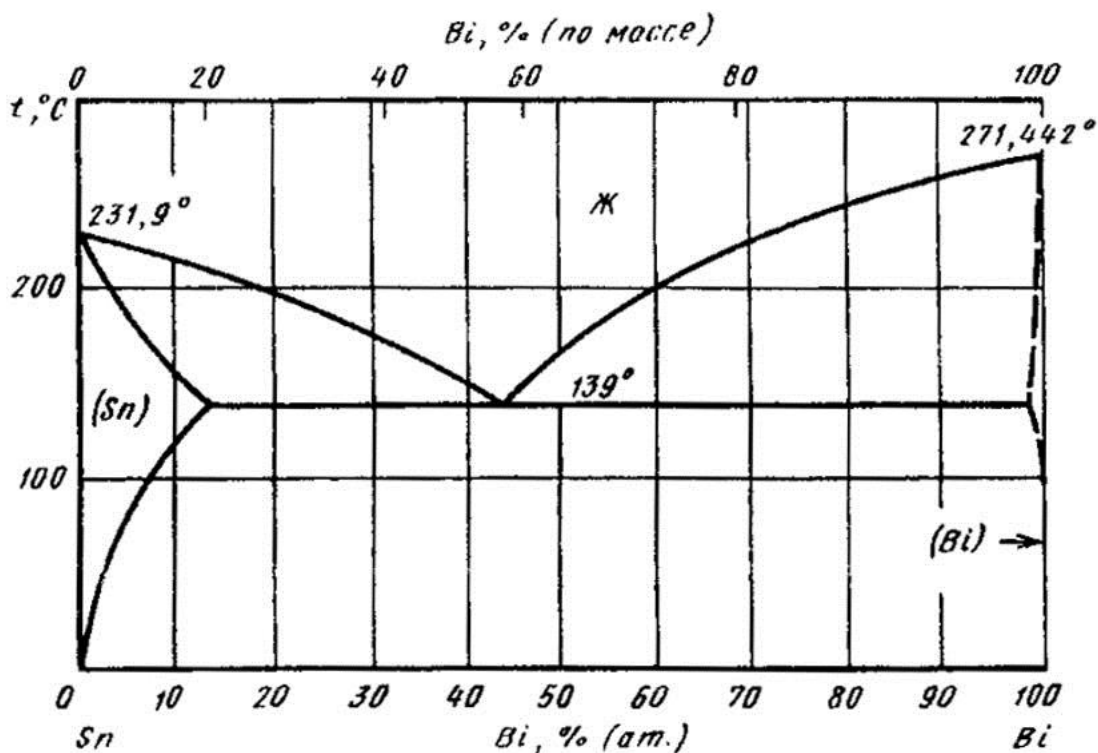


Рисунок 3 - Диаграмма состояния Sn-Bi

Сплав системы Sn-Bi (42Sn/58Bi, 138 °C) (Рис. 3). Применяется при пайке термочувствительных компонентов. Если в процессе присутствует свинец - образуется эвтектика Sn/Pb/Bi. Проведенное NCMS термоциклирование при температурах 0 – 100°C и -55 – 125°C (более 5 тыс. циклов) на платах с органическими покрытиями показали, что сплав по своим характеристикам, в том числе по прочности превосходит Sn/Pb, что может показаться неожиданным, поскольку температура 125 °C близка к точке плавления эвтектики Sn/Bi. Существуют два объяснения этому. Первое – припой Sn/Bi при 125 °C нормализован, благодаря чему внутренние напряжения в ходе термоциклирования снимаются. Второе – припой рекристаллизуется. Кроме того, поскольку припой имеет эвтектическую структуру, отслаивания галтелей не происходит.

Sn-In (48Sn/52In, 118 °C). Применяется для пайки термочувствительных компонентов. Благодаря присутствию индия припой устойчив к окислению, но подвержен коррозии в условиях повышенной влажности. Кроме того, это

очень мягкий металл, имеющий тенденцию к образованию холодно-сварочных соединений. Усталостные характеристики припоя при высоких температурах неудовлетворительны. Высокое содержание индия отражается на цене сплава и препятствует его широкому применению.

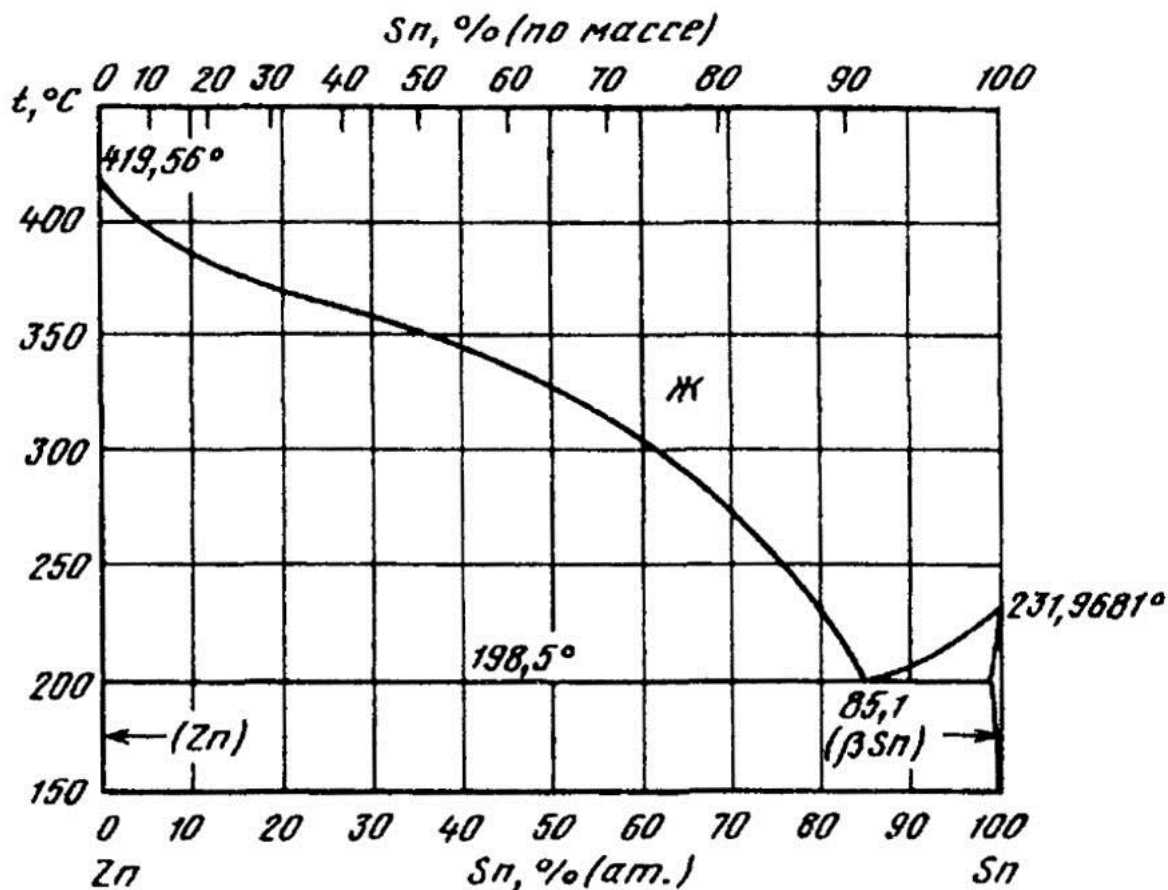


Рисунок 4 - Диаграмма состояния Sn/Zn

Сплав системы Sn-Zn (91Sn/9Zn, 199°C) (Рис. 4). Из – за содержания цинка сплав подвержен коррозии и окислению. Образец, оставленный на воздухе в течении 8 часов, корродирует, приобретая багрянистый оттенок. Припой в форме шариков активно вступает в реакцию с кислотами и щелочами с выделением газа. В течение очень короткого времени цинкосодержащий припой в пасте реагирует с растворителем флюса, в результате чего цинк вызывает отверждение паяльной пасты, поэтому его совместимость с флюсами и стабильность при хранении находятся под большим вопросом. Расплавленный припой при пайке оплавлением не

обладает хорошей смачиваемостью контактных площадок по сравнению с другими бессвинцовыми припоями. При пайке волной припоя наблюдается тенденция к возникновению чрезмерного количества шлаков. Тем не менее, такие сплавы находят применение в промышленности.

Сплав системы Sn-Zn-Bi (89Sn/8Zn/3Bi, 189...199°C). Температура плавления у данного сплава немного выше, чем у сплава Sn63Pb37, однако из-за содержания в своем составе Zn, сплав легко окисляется и образует много шлака припайке волной припоя. Этот сплав в составе паяльных паст имеет очень короткий срок жизни, который может измеряться днями или неделями. Висмут, добавленный в данный сплав, улучшает смачиваемость, уменьшает температуру плавления и увеличивает коррозионную стойкость по сравнению с бинарными сплавами Sn-Zn. Sn-Au (80Sn/20Au, 280 °C). При термоциклировании возникают трещины. Природа этого явления не изучена. Высокая стоимость ограничивает применение сплава во многих областях, где стоимость – основной фактор, определяющий пригодность того или иного сплава. Очевидно, что олово и в будущем останется основным компонентом припоя монтажной пайки [13].

Анализ литературных и патентных материалов указывает на возможность повышения технологических и эксплуатационных характеристик припоев системы Sn-Zn с введением дополнительных легирующих элементов [9].

1.2 Основные системы бессвинцовых припоев:

Таблица 1 - Основные системы бессвинцовых припоев.

| Тип | Состав (мас. части), % | Температура плавления, °С |
|---|------------------------|---------------------------|
| Низкотемпературные бессвинцовые припои | | |
| Sn/Bi (олово/висмут) | Sn42/Bi58 | 135...140 (эвтектика) |
| Sn/In (олово/индий) | Sn48/In52 | 115...120 (эвтектика) |
| Bi/In (висмут/индий) | Bi67/In33 | 107...112 |
| Низкотемпературные бессвинцовые припои для замены эвтектики Sn/Pb | | |
| Sn/Zn (олово/цинк) | Sn91/Zn9 | 195...200 |
| Sn/Bi/Zn (олово/висмут/цинк) | Sn89/Bi3/Zn8 | 189...199 |
| Sn/Bi/In (олово/висмут/индий) | Sn70/Bi20/In10 | 143...193 |
| Среднетемпературные бессвинцовые припои | | |
| Sn/Ag (олово/серебро) | Sn96,5/Ag3,5 | 221 (эвтектика) |
| Sn/Ag (олово/серебро) | Sn98/Ag2 | 221...226 |
| Sn/Cu (олово/медь) | Sn99,3/Cu0,7 | 227 (эвтектика) |
| Sn/Ag/Bi (олово/серебро/висмут) | Sn93,5/Ag3,5/Bi3 | 206...213 |
| Sn/Ag/Bi (олово/серебро/висмут) | Sn90,5/Ag2/Bi7,5 | 207...212 |
| Sn /Ag /Cu (олово/серебро/медь) | Sn95,5Ag3,8/Cu0,7 | 217 (эвтектика) |
| Sn/Ag/Cu/Sb (олово/серебро/медь/сурьма) | Sn96,7/Ag2/Cu0,8/Sb0,5 | 216...222 |
| Высокотемпературные бессвинцовые припои | | |
| Sn/Sb (олово/сурьма) | Sn95/Sb5 | 232...240 |
| Sn/Au (олово/золото) | Au80/Sn20 | 280 |

Таблица 2 – Сравнение стоимости припойных сплавов.

| Система Легирования | Температура плавления, °С | Сравнительная стоимость по отношению к Sn63Pb37 |
|------------------------|------------------------------|---|
| Sn-In-Ag | 204-205 | 3,3-3,5 |
| Sn-Ag-Cu | 217 | 2,9-3,3 |
| Sn-Ag | 221 | 3,1 |
| Sn-Ag-Bi | 211-213 | 2,1-3,1 |
| Sn-Bi | 138 | 1,7 |
| Sn-Cu | 227 | 1,5 |
| Sn-Zn | 198 | 1,4 |
| Sn-Pb | 183 | 1 |

Сравнение припойных сплавов (табл. 2) показывает, что все имеющиеся на данный момент на рынке сплавы дороже традиционного Sn-Pb-припоя [12]. По стоимости Sn-Zn-припой является в настоящее время возможным альтернативным вариантом. Однако высокое сродство цинка к кислороду и образование соответствующих окислов значительно ухудшает смачиваемость и требует применения более агрессивного флюса. Остатки таких флюсов ухудшают изоляционные свойства электронных узлов и должны удаляться дополнительными операциями. Это увеличивает стоимость узлов и нагрузку окружающей среды. Другим по стоимости возможным вариантом является Sn-Cu-припой, который из-за своей температуры плавления требует значительно более высокую температуру пайки. Поэтому этот припой применяется только в некоторых особых случаях. Sn-Bi-припой в свою очередь отличается более низкой температурой плавления и стоимость его ниже стоимости Ag- и In-содержащих припоев [14].

Наилучшей альтернативой для замены оловянно – свинцового припоя является система Sn-Zn (табл. 1) , которая по ряду важных характеристик: температура плавления, температура эксплуатации, стоимости, сопротивлению ползучести и кратковременной прочности имеет наиболее лучшие показатели. Однако система Sn-Zn требует дополнительного легирования для того чтобы решить задачу высокого сродства цинка к кислороду и образования соответствующих окислов, которые значительно ухудшает смачиваемость.

Для устранения таких недостатков в припой Sn-Zn вводили In. Замена 5% олова на такое же количество индия позволяет снизить температуру плавления до 188°C, что лишь на 5°C превышает температуру плавления ПОС 61 (183°C). Для достижения хорошей смачиваемости на воздухе необходимо применять флюс с высокой активностью, а при пайке в инертной среде (например, в азоте) хорошая смачиваемость у In-содержащих припоев может быть достигнута при значительно меньшей активности флюса.

Однако припой системы Sn-Zn так же, создают возможность бесфлюсовых способов пайки из-за обладания высокой упругости паров цинка.

Паровой фаза цинка создает возможность для регулирования состава припоя, температура и время выдержки позволяют управлять составом припоя.

1.3 Бессвинцовые технологии

Традиционный монтаж в электронной промышленности основан на использовании оловянно-свинцовых припоев с содержанием олова и свинца в отношении 60:40 либо 63:37 с температурой плавления, равной или близкой к 183°C.

Было предложено большое количество бессвинцовых припоев взамен традиционных, имеющих в своем составе свинец, с температурами плавления от значительно более низких до значительно более высоких, чем у припоев содержащих свинец. Для того чтобы установить определенное соответствие бессвинцовых припоев припоям, содержащих свинец, ряд таких организаций, как Soldertec, IPC и Intellect, рекомендовали промышленности в большинстве применений ограничить свой выбор припоев и специальных сплавов.

Припои, основанные на сплаве Sn-Ag-Cu, известные как припои SAC, широко применяются как для пайки оплавлением, так и для пайки волной. Оловянно-медные припои используются в волновой пайке. Температуры плавления этих припоев лежат в диапазоне 215...220°C. Для волновой пайки подходит оловянно-медный эвтектический сплав (Sn-0,7Cu) с температурой плавления 227°C, являющийся одним самых дешевых бессвинцовых сплавов на рынке.

Таким образом, для большинства Европейских компаний, переходящих на бессвинцовые припои, основными проблемами во всем процессе производства сконцентрированы вокруг использования разных систем припоев и факта, что все они, по всей видимости, потребуют более высоких температур пайки. [1]

Бессвинцовая пайка оплавлением

Для температур пайки придется изменить и оптимизировать оборудование, а так же параметры процесса, такие как плавление для каждого определенного сплава.

Основной вклад в оптимальный термический профиль вносят размер и вес сборки, плотность компоновки, соотношение больших и малых элементов, а также тип используемой паяльной пасты. Термический профиль должен также оптимизироваться для каждого выбранного сплава.

Условия пайки также должны быть оптимизированы для комбинации типа сборки, паяльной пасты и прочих ограничений, связанных с используемыми материалами. Бессвинцовые компоненты могут паяться конвекционно, но большинство проблем может быть решено применением современных печей с принудительной конвекцией и большим количеством нагретых зон с более точным контролем над процессом плавления.

Пайка волной припоя.

Одним из существенных требований для формирования высококачественного паяного соединения в процессе пайки волной является правильная комбинация флюса, нагрева и припоя. Критические переменные включают нанесение флюса, подогрев, температура припоя и время воздействия припоя.

В случае условий волновой пайки, не оптимизированных под конкретный тип платы и сплав припоя, могут создаваться условия для большого количества дефектов. Среди прочего возможно образование перемычек между контактными площадками, пайка с излишками припоя. Платы могут также повреждаться.

Феномен, известный как отслаивание контакта, наблюдался в бессвинцовых сборках, впрочем это не приводит к каким-либо

существенным отказам. Могут иметь место другие проблемы, включая отслаивание контактных площадок и разрушение соединений.

Использование разных типов припоев приводит к возможности нежелательного загрязнения тигля, приводящего к композиционным изменениям состава припоя. Увеличение содержания меди в припое приводит к интерметаллическим образованиям, уровень которых увеличивается с увеличением температуры пайки.

Со течением времени концентрация меди может достичь 2%, что приводит к дендритной кристаллизации, возникающие при этом оловянно-медные образования осаждаются на дне тигля, затрудняя смену припоя. Как только концентрация меди превышает 1,55%, целесообразно заменить припой, сменив его новым. Тип гальванического покрытия контактов печатных плат также влияет на уровень растворения меди в ванне с припоем, и применение никелирования может дать положительный эффект[16].

Ручная пайка

Как правило, ручная пайка обычно выполняется ближе к концу процесса сборки. Обычно к этому моменту большая часть элементов установлена, а значит, исправно налаженный процесс бессвинцовой пайки нужен для того, чтобы избежать дорогостоящих ошибок.

Обучение операторов и контроль за процессом ручной пайки может оказывать определяющее влияние на снижение стоимости производства и повышение производительности.

Простое увеличение температуры паяльника при переходе на бессвинцовую пайку может лишь частично решить вопрос качественного паяного соединения. Альтернативный вариант - увеличенная продолжительность контакта[1].

Можно сделать следующие основные выводы:

сплав необходимо выбирать, руководствуясь типом производства, условиями работы конечного изделия, типом покрытия печатной платы и выводов компонентов, чувствительностью компонентов к температуре и технологией пайки.

Анализ литературных и патентных данных показывает, что одним из перспективных направлений развития исследований является система Sn-Zn исходя из следующих соображений:

1. Этой системе присуща высокая упругость паров цинка и имеющийся опыт по контейнерной пайке в парах цинка указывает на возможность реализации процесса бесфлюсовой пайки.
2. Процесс жидкофазного насыщения припоя Zn из паровой фазы позволяет регулировать состав и свойства паяных соединений.

Для достижения цели диссертационной работы следует решить следующие задачи:

1. Определить температурно-временные режимы процесса пайки исходя из условий испарения цинка при соответствующем экранировании объема рабочего пространства контейнера.
2. Исследовать поверхностные взаимодействия паровой фазы цинка, обеспечивающие смачивание и растекание припоя по паяемой поверхности.

1.4 Бессвинцовый припой Sn-Ag-Cu.

1.4.1 Анализ системы сплавов Sn/Ag/Cu

Сегодня в промышленности сложилось единое мнение, что одной из лучших альтернатив для замены эвтектики Sn62-Pb38 в аппаратуре общего назначения является система Sn-Ag-Cu.

Сплав олова, серебра и меди является трехкомпонентным эвтектическим припоем, имеющим температуру плавления 217°C, однако точный состав до сих пор не уточнен. Медь добавляется в систему Sn-Ag (рис. 5) из – за медленного растворения Cu, что снижает температуру плавления и улучшает смачиваемость, ползучесть и термические усталостные характеристики [17].

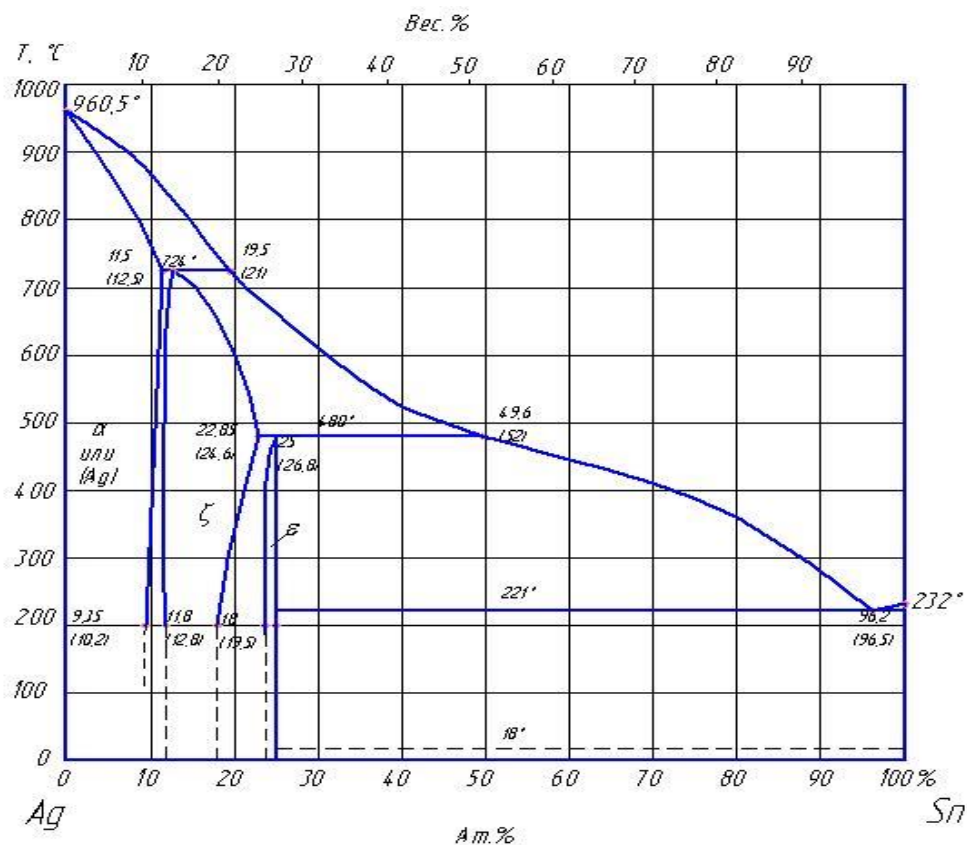


Рисунок 5 - Диаграмма состояния Sn/Ag

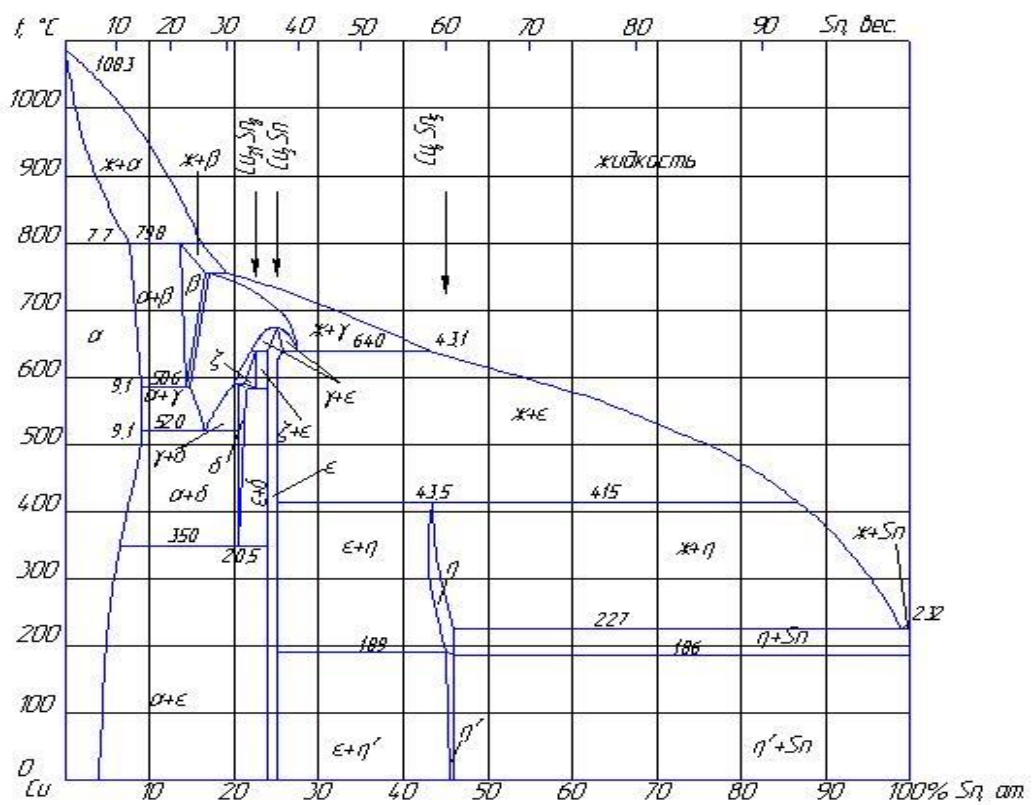


Рисунок 6 - Диаграмма состояния Sn/Cu

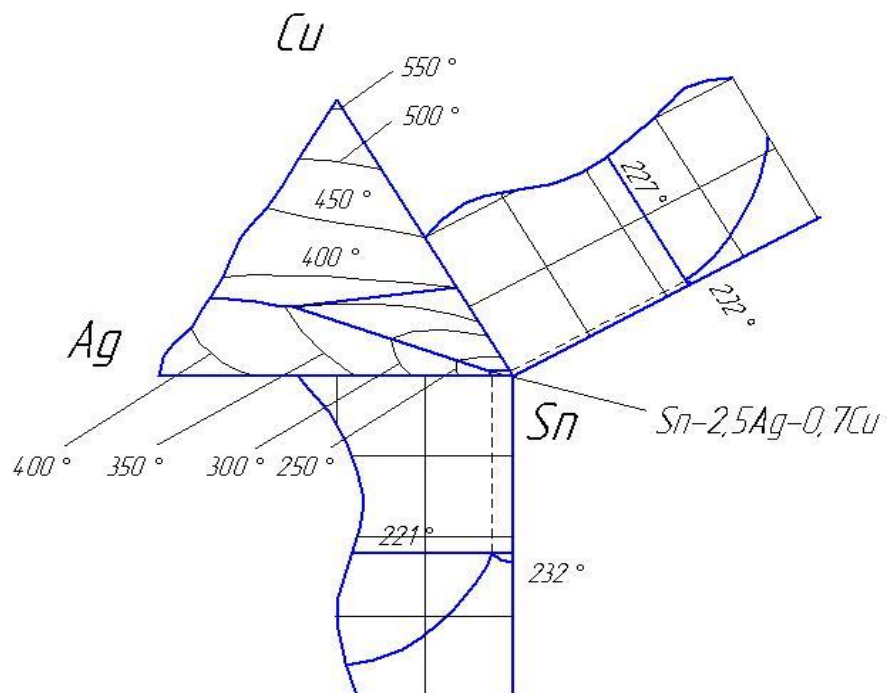


Рисунок 7 - Диаграмма состояния Sn/Ag/Cu

Проведенные исследования некоторых крупных производителей электронной продукции показали, что выход годных и надежность припоев системы Sn-Ag-Cu (Рис.7) сопоставимы или лучше, чем у эвтектического припоя Sn-Pb. Исследование Brite – Euram показало, что данный припой имеет лучшую надежность и паяемость, чем припои Sn-Ag, Sn-Cu (Рис. 6), и он был рекомендован для универсального использования. Вот несколько примеров:

- Sn93,6 /Ag4,7/ Cu1,7 (температура плавления – 216 – 218 °С, AMES Labs, исследует все припои, содержащие 3,5 – 7,7%)

- Sn95 /Ag4,0 /Cu1 (температура плавления – 217 – 219 °С, разработчик AMES Labs)

- Sn96,5 /Ag3,0 /Cu0,5 (Harris Brazing Co.)

- Sn95,5 /Ag4,0 /Cu0,5 (температура плавления – 217 – 219 °С, материал о нем опубликован 50 лет назад, не запатентован)

- Sn95,5 /Ag3,8 /Cu0,7 (температура плавления – 217 – 219 °С, не запатентован)

- Sn96,3 /Ag3,2 /Cu0,5 (температура плавления – 217 – 218 °С, не запатентован)

- Sn95,75 /Ag3,5 /Cu0,75 (Senju).

Припой с составом 95,5Sn/ 3,8Ag/ 0,7Cu рекомендован для Brite-Euram project (European Research in Advanced Materials). Этот проект показал, что такой тип припоя обладает лучшей надежностью и паяемостью, чем бессвинцовые припои, содержащие серебро и медь. Предпочтение тому или иному типу отдается исходя из экономических соображений и оборудования производства. В настоящее время паяные соединения подвергаются все более жестким эксплуатационным требованиям: работа в агрессивных средах, при высоких температурах. Вследствие этого к паяным соединениям предъявляются более высокие требования по улучшению эксплуатационных характеристик.

Альтернативой для замены оловянно – свинцового припоя является тройная эвтектика на основе системы Sn-Ag-Cu, как припой наиболее близкий по комплексу характеристик (температура плавления, температура эксплуатации, стоимости, сопротивлению ползучести и кратковременной прочности) к припою ПОС 61.

1.4.2 Легирование Ge системы сплавов Sn/Ag/Cu

В работах [2] повышение механических свойств и теплопрочности припоев Sn-Ag-Cu было достигнуто дополнительным микролегированием системы припоя Ge [2]

Улучшение эксплуатационных свойств происходит, не только за счет улучшения свойств матрицы сплава (твердого раствора), но и за счет дисперсионного упрочнения. Количество вводимого германия составляло сотые доли процента, и ограничивалось пределом его растворимости в сплаве при T пайки, и не оказывало влияния на T плавления и жидкотекучесть.

Реализация такой технологии изготовления припоя обеспечивает повышение прочности припоя и паяного соединения за счет того, что германий в процессе изготовления припоя и пайки зафиксирован в виде равномерно распределенной мелкодисперсной фазы.

Разработанный состав припоя, технология его изготовления и опытно промышленная проверка прошли при изготовлении и испытаниях бортового компьютера автомобилей ВАЗ - «ШТАТ115Х23»

Проведенный анализ структуры (рис. 8) на электронном микроскопе LEO 1455VP подтвердило предположение о характере распределения германия. Спектральный анализ показал его равномерное распределение, однако не всегда удавалось зафиксировать германий по причине его малого количества в сплаве.



Рисунок 8 - Структура припоя Sn-2,5Ag-0,7Cu-0,15Ge ($\times 300$)

Припой Sn-2,5Ag-0,7Cu-0,15Ge имеет характерную структуру для сплава эвтектического состава. Она представляет собой пластинчатую структуру, которая кристаллизуется в виде отдельных колоний, центрами которых служат игольчатые скопления. Игольчатые скопления в свою очередь являются предположительно интерметаллидами Ag_3Sn , проведенный спектральный выявил большое количество серебра и малое – олова в этой фазе.

Дальнейшие испытания механических свойств припоев проводились при комнатной температуре на разрывной машине TINIUS OLSEN H50KT со скоростью перемещения захватов 4 мм/мин. В качестве припоев для сравнения брались следующие припои на основе олова: припой ПОС 61; теплопрочный припой на его основе, микролегированный германием и никелем (добавки никеля вводились в припой для возможности его использования при пайке медно-никелевых сплавов); базовый припой Sn-

2,5Ag-0,7Cu. Испытания проводились на специальных образцах (рис. 9). Всего испытывалось по 5 образцов каждого припоя.

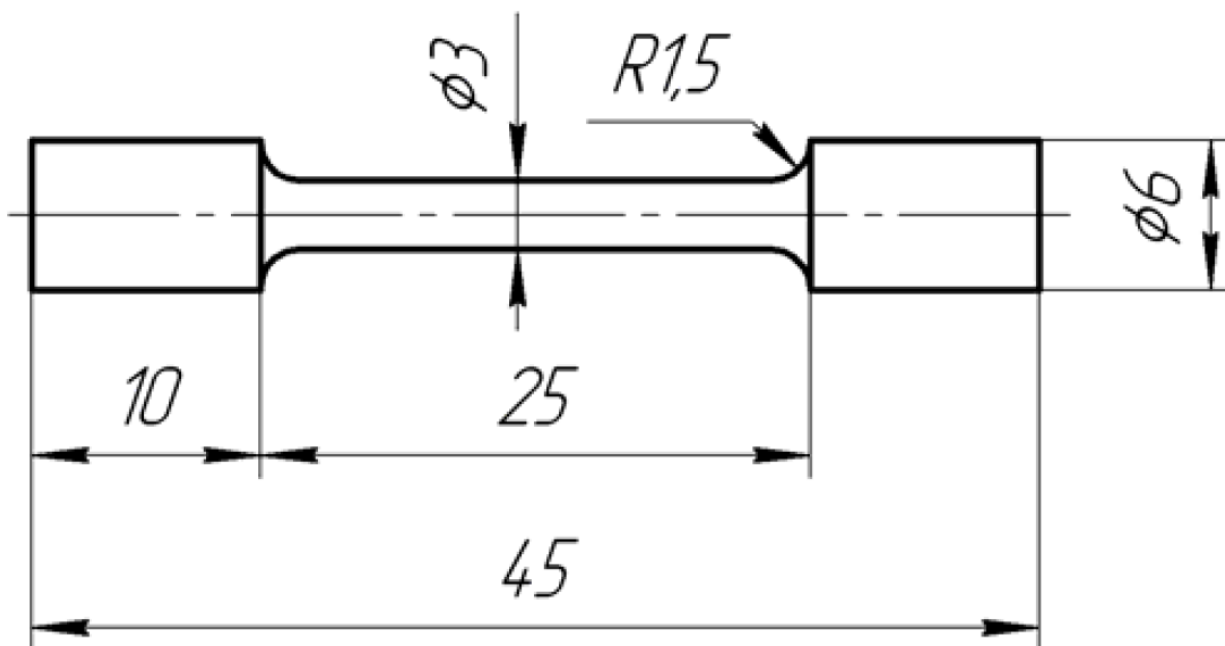


Рисунок 9 - Образец припоя для испытаний на растяжение

Таблица 3 - Механические свойства припоев на основе олова

| Механические свойства | № обр. | Сплавы | | | |
|-----------------------|--------|--------|---------------------------|----------------|----------------------------|
| | | ПОС 61 | ПОС 61+ +0,15Ge+0,15Ni | Sn-2,5Ag-0,7Cu | Sn-2,5Ag-0,7Cu- -0,15Ge |
| σ_b , МПа | 1 | 45,2 | 62,3 | 54,9 | 74,0 |
| | 2 | 46,0 | 62,8 | 58,5 | 71,7 |
| | 3 | 46,8 | 58,6 | 58,6 | 69,4 |
| | 4 | 47,2 | 58,0 | 56,1 | 69,3 |
| | 5 | 47,8 | 59,1 | 63,4 | 71,0 |
| δ , % | | 39 | 36 | 25 | 20 |

Значения механических характеристик позволяют сделать заключение о том, что введение микролегирующей добавки Ge в количестве до 0,15% позволяет получить увеличение прочности на 18% по сравнению с базовым сплавом Sn-2,5Ag-0,7Cu. Аналогичная картина наблюдается и с припоем ПОС 61 [2], где введение Ge позволяет получить увеличение прочности на 22%. Относительное удлинение у сплава системы Sn-Ag-Cu, так же и как в

случае с припоем ПОС 61, после дополнительного микролегирования, снижается на 5%.

Условия и результаты испытания БК «ШТАТ115Х23»

Оценка характеристик надежности паяных соединений БК «ШТАТ115Х23» выполненных с использованием бессвинцового припоя

Все испытания, кроме оговоренных особо, должны проводиться при нормальных климатических условиях по ГОСТ Р 52230:

- температура окружающего воздуха плюс (25 ± 10) °С;
- относительная влажность воздуха от 45 до 80 %;
- атмосферное давление от 84,0 до 106,7 кПа (от 630 до 800 мм. рт. ст.);
- напряжение питания $(13,5 \pm 0,5)$ В постоянного тока.

Бортовой компьютер перед проверкой должен быть выдержан в указанных выше условиях не менее 24 часов, если он находился в других условиях.

Испытание на работоспособность в интервале рабочих температур

Рабочий диапазон температур для функций бортового компьютера от минус 40 до плюс 75°С.

Испытание на работоспособность в интервале рабочих температур следует проводить, поместив испытуемый образец в камеру тепла и холода следующим образом:

- а) проводить функциональный контроль элементов управления;
- б) проводить визуальный контроль функционирования при включенном питании.

Температура и продолжительность испытаний должны соответствовать данным, приведенным на (рис. 10)

Продолжительность испытаний — 144 часа.

Скорость циркуляции воздуха – не менее 2 м/с.

Скорость изменения температуры — не более 3°C/мин.

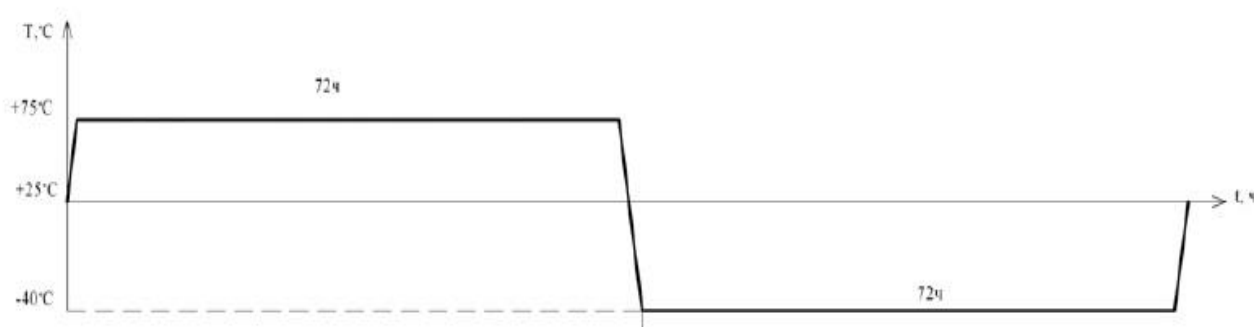


Рисунок 10 - Режимы испытаний на работоспособность в интервале рабочих температур

После проведения испытаний и выдержки бортового компьютера в нормальных условиях в течение суток, провести визуальный осмотр и проверить соответствие бортового компьютера требованиям ОТК.

Испытания на надежность методом ускоренных эквивалентно-циклических испытаний

Испытание на термоциклирование

Испытание на воздействие температурных циклов следует проводить следующем порядке:

- а) бортовой компьютер последовательно помещают в камеры тепла и холода, температура в которых заранее доведена до плюс (75 ± 3) и до минус (40 ± 3) °C соответственно;
- б) время выдержки при каждой из указанных температур — 4 часа;
- в) время перемещения бортового компьютера из камеры холода в камеру тепла и обратно должно быть не более 10 с.

Продолжительность испытаний — 10 циклов.

В конце последнего цикла испытаний после воздействия температуры минус 40 °С проверяется функционирование бортового компьютера.

После проведения испытаний и выдержки бортового компьютера в нормальных условиях в течение суток, провести визуальный осмотр и проверить соответствие бортового компьютера требованиям ОТК.

Испытание на влагостойкость

Испытание на влагостойкость следует проводить в климатической камере с высокой относительной влажностью воздуха и температурой.

Температура и относительная влажность воздуха должны изменяться от (25 ± 3) до (55 ± 3) °С и от 80 до 98 % в соответствии с диаграммой (рис. 11).

Длительность одного цикла — 2 часа, количество циклов — 6.

Продолжительность испытаний — 12 часов.

2) клемма 15 включается при 2, 4 и 6 циклах;

г) визуальный контроль функционирования при включенной клемме 15.

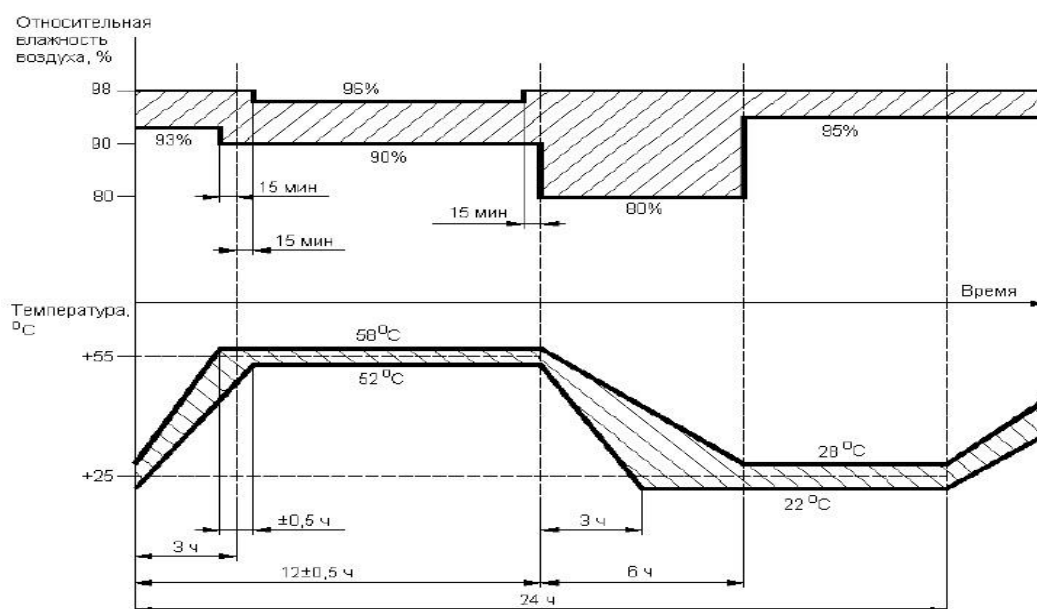


Рисунок 11 - Диаграмма проведения испытания на влагостойкость

После проведения испытаний и выдержки бортового компьютера в нормальных условиях в течение суток, провести визуальный осмотр и проверить соответствие бортового компьютера требованиям ОТК.

Испытание на вибропрочность

Испытание на вибропрочность следует проводить на образцах, прошедших

испытание на воздействие температурных циклов .

Комбинации приборов должны быть закреплены в положении монтажа (как в автомобиле) и находиться во включенном состоянии.

На входы комбинации приборов подают сигналы таким образом, чтобы стрелки находились в середине диапазона шкалы.

Комбинации приборов подвергают воздействию вибрационных нагрузок последовательно по каждой из трех главных осей (синусоидальные колебания) в интервале частот от 50 до 250 Гц и максимальном ускорении 50 м/с². При этом частота колебаний в интервале частот периодически то увеличивается, то уменьшается.

Изменение частоты — 1 октава/мин.

Продолжительность испытаний — 3 часа по каждой оси.

Во время испытаний необходимо периодически наблюдать поведение испытуемого образца.

После испытаний провести визуальный осмотр и проверить соответствие комбинации приборов требованиям.

Механические повреждения деталей и узлов не допускаются

Результаты испытаний

Испытание на работоспособность в интервале рабочих температур

Проверка функционирования проводилась в нормальных климатических условиях (см. п.4.2 ГОСТ Р52230) в диапазоне напряжений питания от 10,8 до 16 В. Замечаний нет.

Испытания на надежность проводились методом ускоренных эквивалентно-циклических испытаний.

Испытания состояли из 10 базовых циклов. Базовый цикл включает в себя последовательное воздействие вибрации в течение 10 ч, 10 термических циклов с выдержкой при каждой температуре по 1 ч и влажности в течение 12 ч. После каждого базового цикла испытаний проводился контроль алгоритма функционирования и электрических параметров компьютеров. Фото плат компьютеров перед началом испытаний приведены на рисунках 12-13.

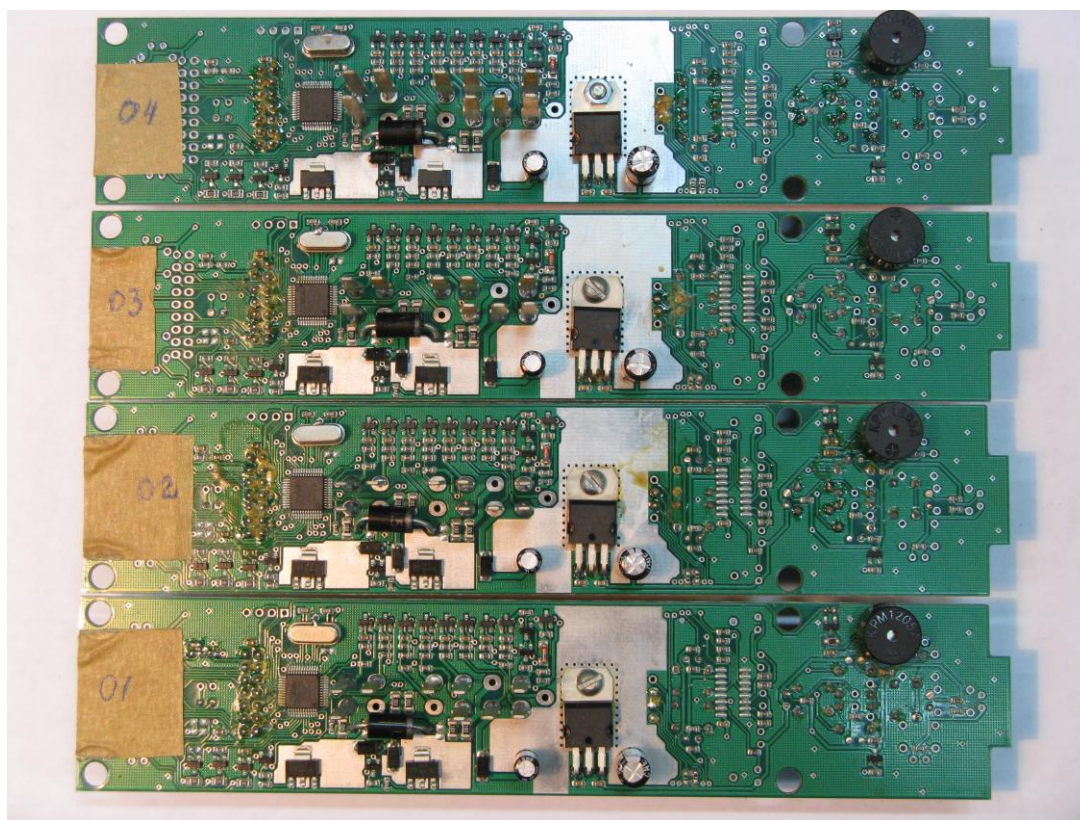


Рисунок 12 - Печатные платы компьютеров перед началом испытаний

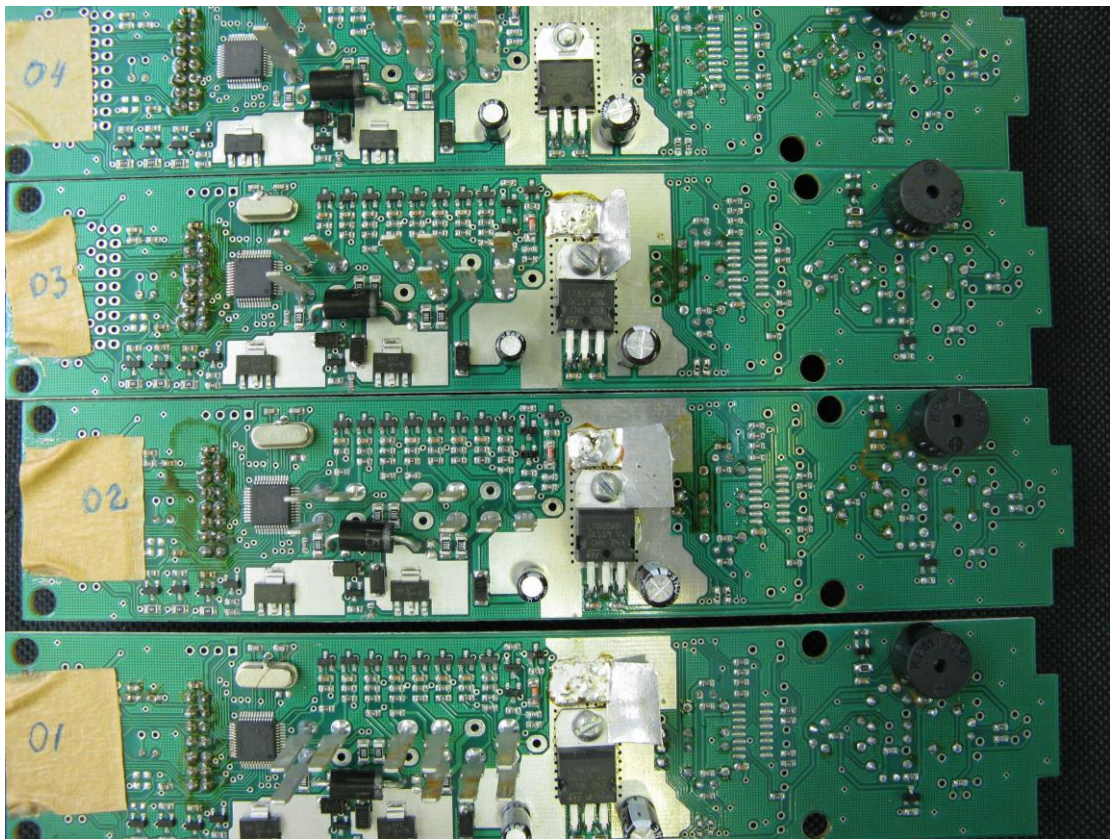


Рисунок 13 - Печатные платы компьютеров по окончании испытаний

По окончании испытаний на надежность (после 10-го базового цикла) к функционированию бортовых компьютеров замечаний нет. Механические повреждения и нарушения лакокрасочного покрытия не выявлены.

2. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПАЙКА ПРИПОЯМИ СИСТЕМЫ Sn-Zn.

2.1 Методика проведения исследований

При планировании проведения эксперимента возникла необходимость применения контейнера с двумя стенками. В отличие от традиционных схем контейнера для сокращения обмена газовой средой, контейнер выполнен с двумя отдельными стенками. Пространство, между которыми засыпано песком. Испаряющимся материалом является цинк. Основной смысл применения контейнера с двумя стенками заключается в том что, есть необходимость создания условий для получения газовой атмосферы с низким парциальным давлением окислительных компонентов, песчаный затвор между первым и вторым контейнером обеспечивает создание этих условий. Схема контейнера для пайки приведена на рисунке 14.

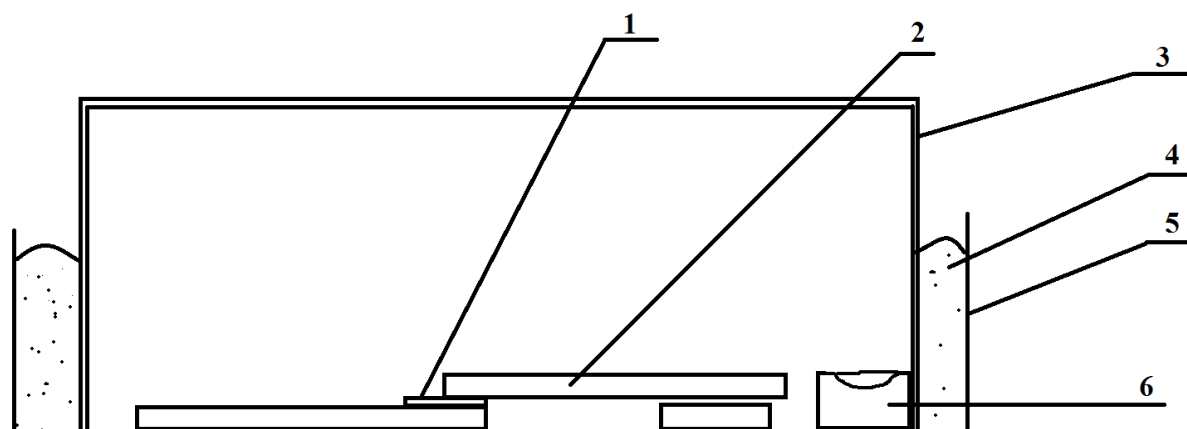


Рисунок 14 - Схема контейнера для пайки.

- 1-Припой Sn
- 2-Паяемое изделие
- 3- Верхняя часть контейнера
- 4-Песчаный затвор
- 5-Нижняя стенка контейнера
- 6-Тигель с Zn

Песчаный затвор в контейнере для пайки с двумя стенками (Рис. 15) выполнен с использованием прокаленного песка для того чтобы снизить содержание примесей выделяемых из песка в воздушную среду контейнера для пайки.

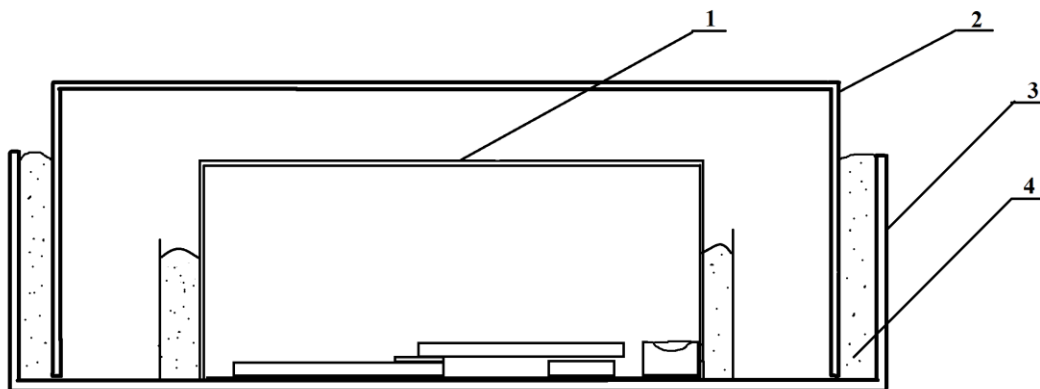


Рисунок 15 - Схема контейнера с двумя стенками для пайки.

- 1-Внутренний контейнер
- 2-Верхняя стенка внешнего контейнера
- 3-Нижняя стенка внешнего контейнера
- 4-Песчаный затвор

2.2 Температурно-временной режим

Для практического использования выбираем температурно-временной режим исходя из приемлемой скорости испарения, которая определяется температурой и давлением паров цинка, область приемлемых температур лежит в диапазоне от 260°C до 600°C.

На рисунке 16 приведен график упругости паров Zn в зависимости от температуры в контейнере для пайки

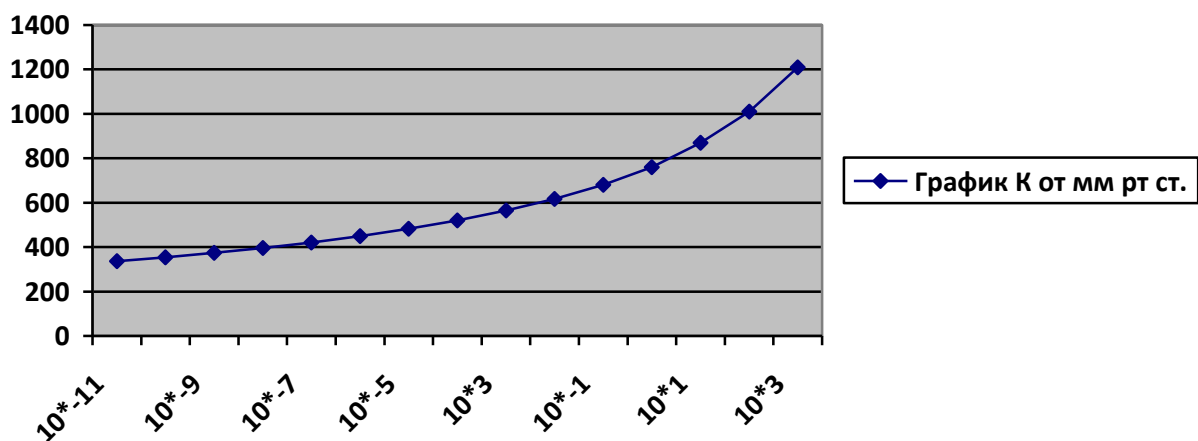


Рисунок 16 - График упругости пара от температуры

Проводились опыты при которых осуществлялся подбор температуры для проведения эксперимента, методом подбора была определена:

- 1) T1 для пайки в вакууме = 600 градусов
- 2) T1 для пайки в воздушной среде = 600 градусов

Формула для скорости испарения:

$$\omega = 0,0585 p \sqrt{M/T} = 6 \cdot (10^{-4}) \sqrt{M/T}$$

Где ω – Скорость испарения г/см²

p- давление насыщенного пара (10⁻² мм рт ст)

M–Молекулярный вес

T- Абсолютная температура К

2.3 Выбор паяльной атмосферы:

Экспериментальные работы по разработке бесфлюсовых способов пайки в парах цинка, показывают, что производительность процесса и образование паяных соединений, может быть достигнута при применении вакуума (низкого атмосферного давления) и воздушной газовой среды с низким парциальным давлением кислорода.

Экспериментальные работы предлагается провести с использованием вакуумной установки и в электропечи с использованием специального контейнера для пайки с двумя стенками.

2.4 Технология контейнерной пайки системы Sn-Zn

Был проведен ряд экспериментов для подбора оптимальных характеристик проведения эксперимента, технология и характеристики были подобраны следующие.

2.4.1 Содержание и последовательность проведения эксперимента (в вакууме):

1. Зачищаем образцы с помощью наждачной бумаги и спирта
2. Производим сборку образцов в контейнере
3. Устанавливаем тигель с цинком в контейнер
4. Закрываем контейнер крышкой
5. По периметру контейнера засыпаем песок
6. Загружаем в вакуумную установку
7. Включаем печь с параметрами:

$T_1=600$ градусов

время выдержки – 15 мин.

Вес образцов – 27,626 г.

Вес Zn – 0.149 г.

Вес Sn – 0.637 г.

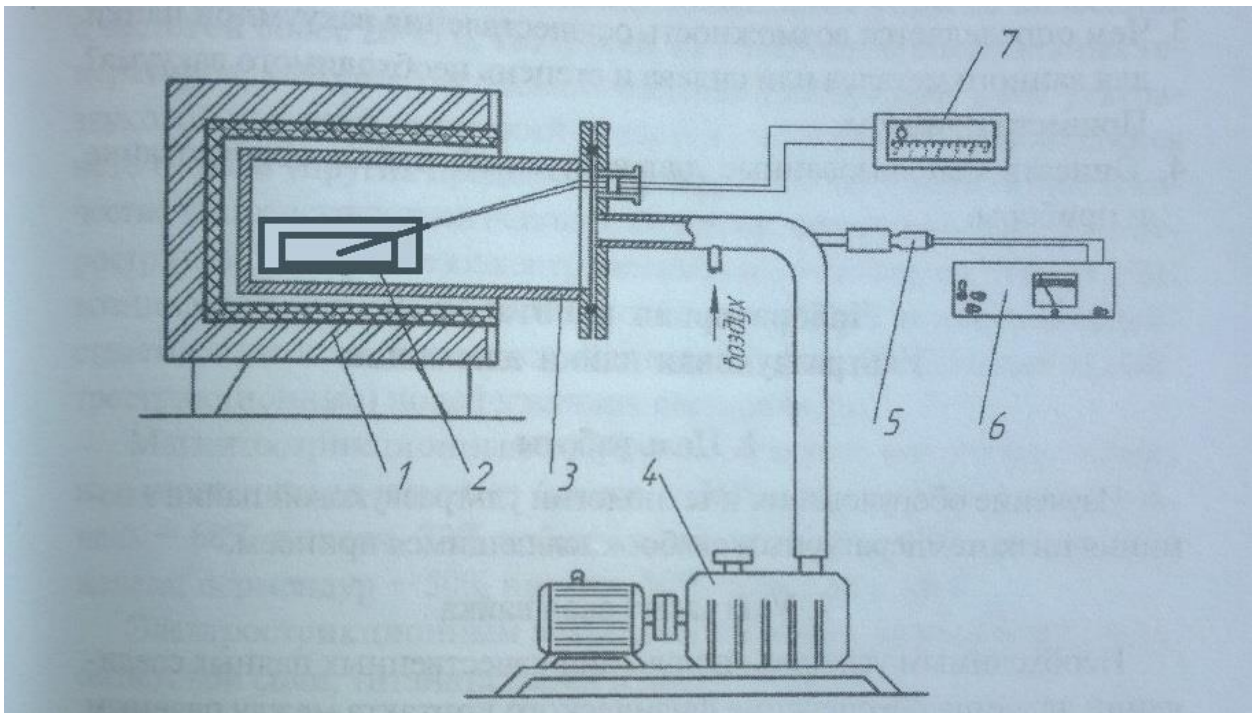


Рисунок 17 - Принципиальная схема установки для пайки в вакууме:

- 1-Электродпечь
- 2-Контейнер для пайки
- 3-Вакуумный контейнер
- 4-Вакуумный насос
- 5-Вакуумная термопарная лампа
- 6-Вакуумметр
- 7-Потенциометр

Таблица 4 - Зависимость скорости испарения от температуры

| Температура °С | Время от начала эксперимента | Скорость испарения Zn мм рт ст |
|-----------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 230 | 5 мин | 10 ⁻⁴ |
| 420 | 8 мин | 10 ⁻¹ |
| 600 | 14 мин | 10 ⁻² |
| Выдержка 15 мин | 29 мин | 10 ⁻² |
| 500 | 32 мин | 10 ⁻¹ |
| 400 | 37 мин | 10 ⁻¹ |
| 300 | 41 мин | 10 ⁻³ |
| 200 | 54 мин | 10 ⁻⁴ |



Рисунок 18 - Образцы в сборе (До пайки)



Рисунок 19 - Образцы в сборе (После пайки)

2.4.2 Содержание и последовательность проведения эксперимента (в воздушной среде):

1. Зачищаем образцы с помощью наждачной бумаги и спирта
2. Производим сборку образцов в контейнере
3. Устанавливаем тигель с цинком в контейнер
4. Закрываем контейнер крышкой
5. По периметру контейнера засыпаем песок
6. Загружаем в нагретую печь с параметрами:
T1=600 градусов

Время для выравнивания температур контейнера и образцов – 10 мин.

Время выдержки – 15 мин.

Вес образцов – 33,758 г.

Вес Zn – 0.209 г.

Вес Sn – 0.717 г.

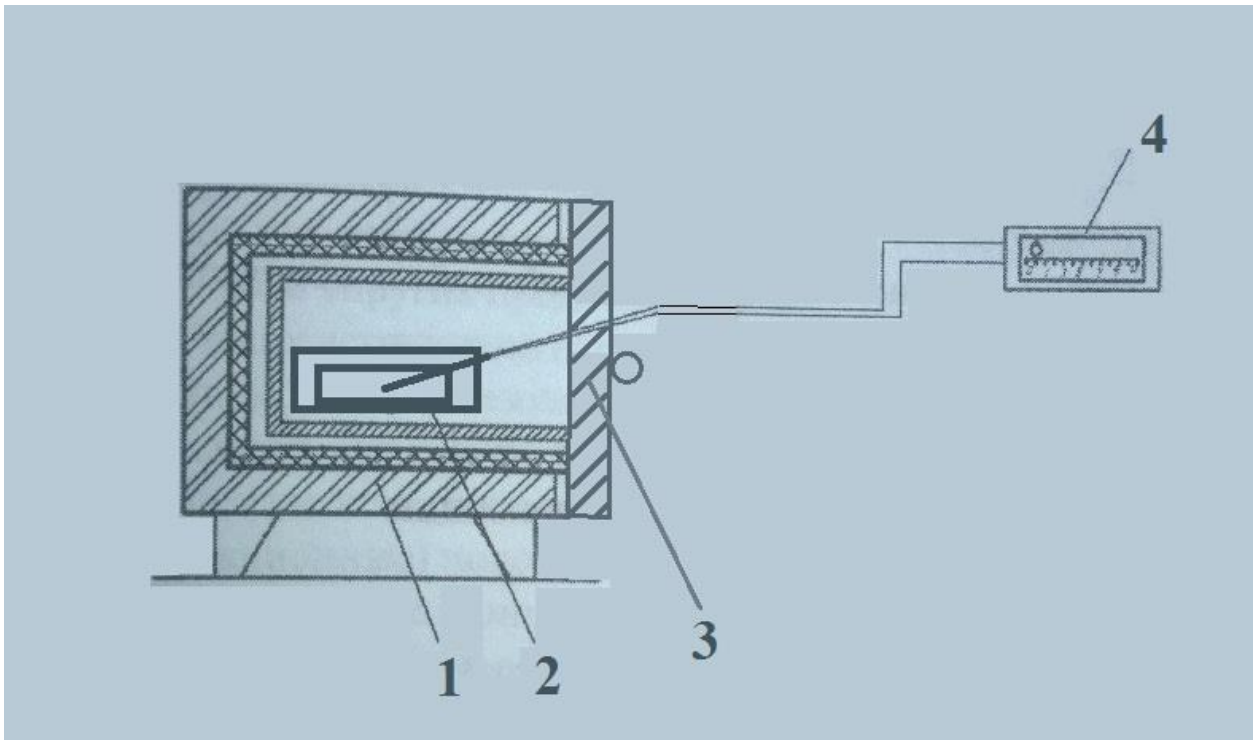


Рисунок 20 - Схема пайки образцов в воздушной газовой среде с низким парциальным давлением кислорода.

- 1-Электродпечь
- 2-Контейнер с двумя стенками для пайки
- 3-Затвор
- 4-Термопара

Таблица 5 – Продолжительность эксперимента

| Температура °С | Время от начала эксперимента |
|--------------------------------------|------------------------------|
| Выравнивание температур | 10 мин |
| Выдержка 15 мин | 25 |
| Охлаждение при комнатной температуре | 65 |



Рисунок 21 - Образцы в сборе (До пайки)



Рисунок 22 - Образцы в сборе (После пайки)

2.5 Структура паяных соединений

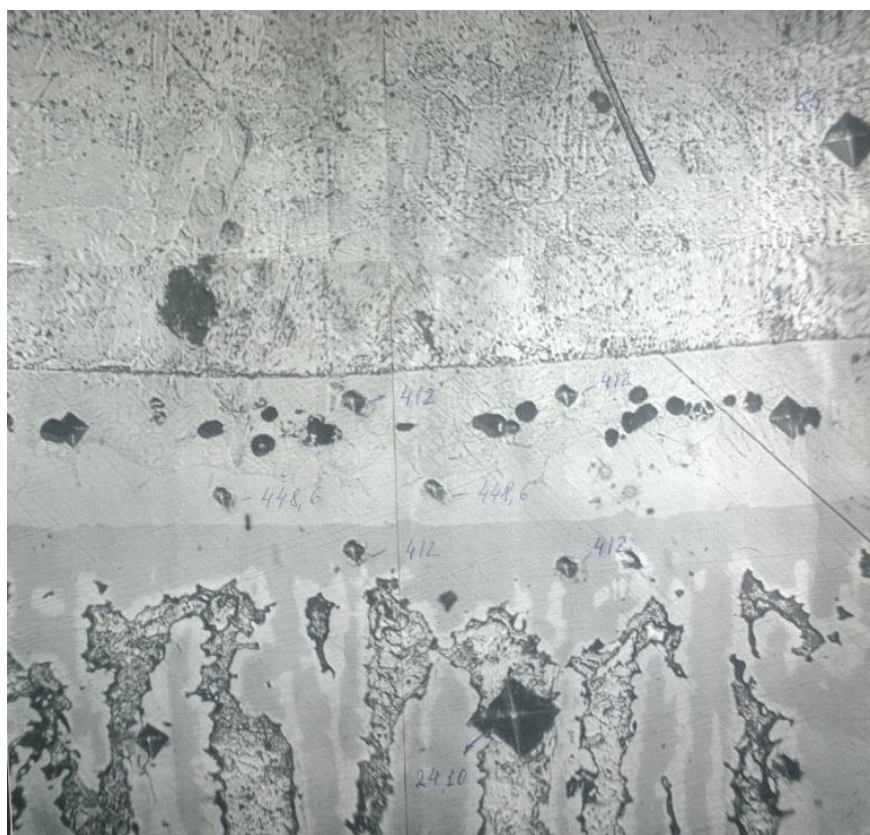


Рисунок 23 – Структура центральной зоны паяного шва (x200)



Рисунок 24 – Структура гальтельного участка паяного шва (x600)

Анализ структуры паяных соединений позволяет сделать следующие предварительные выводы:

1. Установлен каскадный характер взаимодействия паяемого материала с отдельными компонентами припоя, сначала с оловом, затем с цинком
2. Повышенное значение микротвердости зоны прилегающей к межфазной границе может свидетельствовать о низкой пластичности паяного шва

3 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ

Пайка является безопасным процессом, если соблюдаются соответствующие правила. Однако, как и при любом другом технологическом процессе, при проведении пайки необходимо соблюдать определенные меры предосторожности. Поэтому очень важно, чтобы работник знал о возможных причинах несчастных случаев и соблюдал правила техники безопасности. Рекомендуется, чтобы каждая операция была тщательно продумана инженером по технике безопасности, и для каждого вида работ были разработаны соответствующие меры безопасности.

Возможными причинами травматизма являются действия нагрева газов и химикатов. Главными условиями безопасной работы являются хорошая вентиляция участка пайки, защита работников от ожогов и умение обращаться с флюсами и другими материалами.

Одной из причин несчастных случаев, которую невозможно предусмотреть никакими инструкциями, является личная небрежность оператора: её можно устранить только при постоянном внимании при выполнении работ.

Припой и флюсы, применяемые при выполнении работ, содержат вещества, которые, попадая в желудок, могут вызвать отравление. Поэтому после окончания работы и перед приемом пищи необходимо тщательно вымыть руки.

Основной причиной использования бессвинцовых технологий стала опасность для здоровья человека свинца и его производных.

Вред свинца заключается в его токсичности. Клиническое отравление свинцом всегда было одним из наиболее опасных производственных заболеваний.

Медико-технические рекомендации по предотвращению отравления сказались в значительном снижении регистрируемых случаев заболевания, а также в менее серьезных клинических проявлениях. Однако, сейчас ясно, что

опасное воздействие проявляется при таких уровнях доз (концентраций), которые до сих пор рассматриваются как приемлемые на производстве.

Промышленное потребление свинца приводит к тому, что вредному воздействию подвергаются представители многих профессий.

При плавке свинца главную опасность представляет собой свинцовая пыль, производимая при операциях измельчения и сухого размола, и пары свинца и оксида свинца, которые выделяются при агломерации, восстановлении в доменном процессе и очистке.

Вред и опасность работы со свинцом увеличивается с увеличением температуры. Если обработка свинца происходит при температурах ниже 500 °С, например, при пайке, то вред воздействия паров намного ниже, чем в случае сварки, когда используется высокая температура пламени и опасность выше.

Однако что в одном, что в другом случае вред имеет место быть.

Пути проникновения в организм

Основной путь проникновения в условиях производства - дыхательные пути. Некоторое количество может быть поглощено с током воздуха, но основная часть попадает в организм через легочный круг кровообращения. Степень поглощения определяется процентным содержанием в воздухе пылевых частиц размерами менее 5 мкм и от минимального объема легких определенного рабочего, на которого было оказано воздействие. Увеличенная нагрузка на работе, таким образом, приводит к большему поглощению свинца.

Довольно часто корреляция между концентрацией свинца на рабочем месте и содержанием свинца в крови проявляется несущественно; определенно, что здесь должна учитываться индивидуальная основа.

Биологический путь в организме

Скорость всасывания свинца определяется его химической и физической формой и физиологическими характеристиками человека, который подвергается воздействию (например, от упитанности и от возраста).

В минерализующихся тканях свинец накапливается в определенных их частях, отличающихся по скорости резорбции свинца.

В исследованных случаях однократного воздействия на взрослых, период полужизни свинца в крови составил примерно 25 дней, в мягких тканях - около 40 дней, а в инертных частях костей - более 25 лет. Следовательно, после разового воздействия уровень содержания свинца в крови человека может начать возвращаться к нормальному, но общая масса свинца в организме остается повышенной.

Для того, чтобы произошла интоксикация свинцом, не требуется сильное воздействие большими дозами свинца. Происходит накопление этого металла в организме в течении всей жизни, а выход свинца из организма происходит медленно, поэтому даже небольшие дозы могут привести к интоксикации. Именно суммарная масса свинца в организме вызывает риск возникновения неблагоприятных последствий.

Таким образом, переход промышленности на бессвинцовые технологии является необходимой составляющей для защиты здоровья рабочих самых различных профессий, а так же окружающей нас среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлена возможность и температурно-временной режим высокотемпературной контейнерной пайки оловянными припоями с активацией поверхностей паровой фазой цинка.
2. Показано, что процесс активирования паровой фазы цинка возможен как в вакууме, так и в воздушной среде.
3. Установлен каскадный (последовательный) характер взаимодействия элементов паяльной системы при образовании структуры паяного шва

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/publ/_compel/pb-free_2.htm
2. <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C88/105.pdf>
3. Парфенов, А. Еще раз о европейской «бессвинцовщине» / А. Парфенов // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – №5. – С. 60 – 61.
4. Григорьев, В. Бессвинцовая технология - требование времени или прихоть законодателей от экологии? /В. Григорьев //Электронные компоненты. – 2001. - №6. – С. 72-78.
5. Валентинова, М. Электроника, «дружественная» окружающей среде /М. Валентинова //Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2004. – №5. С. 50-51.
6. Зенин, В. Припой и покрытия для бессвинцовой пайки изделий микроэлектроники / В. Зенин, А. Рягузов, В. Бойко, В. Гальцев, Ю. Фоменко // Технологии в электронной промышленности. – 2005. – №5. – С. 46 – 51.
7. Медведев, А. Бессвинцовые технологии монтажной пайки. Что нас ожидает? /А. Медведев //Электронные компоненты. – 2004. – №11. С. 29 – 33.
8. Россошинский, А.А. Олово в процессах пайки / А.А. Россошинский, Ю.К. Лапшов, Б.П. Яценко. – Киев. : Наукова думка, 1985. – 200 с.
9. Манко, Г. Пайка и припой / Г. Манко, пер. М.Б. Тапельзон. – М. : Машиностроение, 1968. – 322 с.
10. Лонгфорд, Э. На пути к бессвинцовой автомобильной электронике / Лонгфорд Э. // Производство электроники: Технологии, оборудование, материалы. – 2008. – №1. – С. 11-13.
11. <http://works.tarefer.ru/98/100313/index.html>
12. http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/publ/_compel/pb-free.htm
13. http://www.tech-e.ru/2005_5_46.php

14. <http://www.go-radio.ru/lead-free-solder.html>
15. Петрунин И.Е. «Металловедение пайки»/И.Е. Петрунин, И.Ю. Маркова, А.С. Екатова. - М. : «Металлургия», 1976. - 263 с.
16. Лашко Н.Ф «Вопросы теории и технологии пайки»/ Н.Ф. Лашко С.В. Лашко. – Саратов : «Саратов», 1974. – 246 с.
17. Новоттник, М. Проблемы при применении бессвинцовых припоев в электронной промышленности Европы / М. Новоттник, К. Виттке, В.Шеель // Сб. докл. меж. науч. техн. конф. «Пайка-2005» Тольятти 2005 г. – Тольятти : изд. Тол. ун-та, 2005. – С. 100-105.
18. Павлов, Н. Проблемы бессвинцовой пайки. Международный форум «Асолд-2008» / Н. Павлов // Компоненты и технологии. – 2009. – №2. – С. 120 – 128.