

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 кафедры)

15.04.01 «Машиностроение»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

«Технология и оборудование для пайки»

(направленность (профиль))

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему Исследование возможностей индукционной пайки в контролируемой атмосфере

Студент

В.С. Журавель

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (подпись)

Научный  
руководитель

А.Ю. Краснопевцев

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (подпись)

Консультанты

А. Г. Егоров

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (подпись)

Руководитель программы

к.т.н., доцент,

А.Ю. Краснопевцев

(ученая степень, звание И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (подпись)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

д.т.н., проф.

В.В. Ельцов

(ученая степень, звание И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (подпись)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Тольятти 2019

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Состояние вопроса.....	5
1.1 Индукционный нагрев. Принцип действия .....	5
1.2 Индукционная пайка .....	7
1.3 Контролируемые атмосферы.....	8
1.4 Индукционная пайка в контролируемой атмосфере.....	23
1.5 Особенности пайки стали .....	25
1.6 Особенности пайки меди и его сплавов .....	33
1.7 Описание и характеристики стали марки Ст 3 .....	36
1.8 Описание и технологические свойства меди.....	38
1.9 Описание припоев .....	40
1.9.1 Припой марки Л63.....	40
1.9.2 Припой марки ЛКБО 62-0,2-0,04-0,5.....	41
1.9.3 Припой марки П 81 .....	42
1.9.4 Припой марки Алармет 211 .....	44
1.9.5 Припой марки ПСр-45 .....	44
1.10 Описание флюса ФК-320.....	46
1.11 Задачи магистерской диссертации .....	47
2 Методика исследования .....	48
2.1 Разработка методики проведения исследований индукционной пайки в контролируемой атмосфере .....	48
2.2 Разработка системы с контролируемой атмосферой .....	52
2.3 Пайка пластин .....	57
2.4 Исследование растекания припоя.....	60
2.5 Исследование прочности паяных соединений .....	61
3 Результаты исследования .....	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	74
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	75

## ВВЕДЕНИЕ

Технологические процессы индукционной пайки возникли и развиваются одновременно с другими процессами высокочастотного нагрева металлов. «Широкое внедрение индукционной пайки обусловлено такими ее преимуществами по сравнению с печной и газопламенной пайкой, как более высокая производительность, менее тяжелые условия труда, обеспечение четкой фиксации взаимного положения паяемых деталей, пониженный расход припоев и флюсов, возможность механизации и автоматизации процесса, получение более плотных швов с высокими эстетическими свойствами. В ряде случаев применение индукционного нагрева позволяет повысить прочность паяных соединений, например, трубопроводы из нержавеющей стали, паяные при высокочастотном нагреве, имеют предел выносливости на 30% выше, чем выполненные газопламенной пайкой. Перечисленные достоинства обеспечивают индукционной пайке применение во всех отраслях машиностроения» [3].

Получение индукционной пайкой соединений, в основном, реализуется с применением флюса, «однако обусловленные физикой процесса преимущества пайки наиболее полно реализуются в условиях бесфлюсовой пайки. Пайка по бесфлюсовой технологии получает все большее распространение по следующим причинам. Остатки флюсов обладают высокой коррозионной активностью, процесс удаления остатков флюсов требует дополнительных трудозатрат. Кроме того, технологии флюсовой пайки требуют дополнительных приемов по защите окружающей среды» [23].

Вследствие этого, давно разрабатывают и внедряют бесфлюсовые технологии пайки, такие, как пайка в вакууме, пайка в защитных газовых средах (нейтральных и активных), ультразвуковая пайка и др. Однако не стоит забывать и про совместное применение контролируемых атмосфер с флюсами. «В случае применения только контролируемой атмосферы, детали получают абсолютно чистыми и не требуют дальнейшей очистки после пайки. В свою очередь, контролируемые атмосферы с использованием флюса положительно влияют на

продолжительность действия флюса, а очистка изделий сводится к минимуму» [30].

Исходя из вышесказанного, разработка новых способов с применением контролируемой атмосферы является актуальной.

Таким образом, целью данной работы является повышение качества паяных соединений при помощи индукционного нагрева в контролируемой атмосфере.

# 1 Состояние вопроса

## 1.1 Индукционный нагрев. Принцип действия

В последнее время развитие индукционного нагрева происходило более активно, чем другие процессы, связанные с использованием тепла, выделяемого электрическим током. Объясняется это большими экономическими и технологическими преимуществами, такими как: затрачиваемая электроэнергия, качество продукции, производственная гибкость и общая эффективность.

На данный момент индукционный нагрев применяется в различных отраслях промышленного производства: металлургии, машиностроении, строительстве и сельском хозяйстве. Индукционный процесс нагрева характеризуется быстротой, точностью, чистотой, низким энергопотреблением, управляемостью и воспроизводимостью.

«Под индукционным нагревом понимают нагрев при бесконтактной передаче электроэнергии в заготовку электрическим полем, возникающим вокруг проводника, по которому течет переменный ток» [1].

«Принцип действия индукционного нагрева заключается в образовании мощных токов разной частоты с помощью генератора, в процессе чего вокруг индуктора возникает электромагнитное поле (рисунок 1). Именно оно наводит вихревые токи, которые разогревают поверхностный слой заготовки. При высокой частоте вихревые токи вытесняются образованным ими же магнитным полем в поверхностные слои изделия, в результате этого их плотность возрастает и заготовка нагревается. Нижние слои металла нагреваются за счет теплопроводности. Глубина проникновения вихревых токов зависит от частоты: чем частота выше, тем поверхностный слой, куда проникают вихревые токи тоньше» [2].

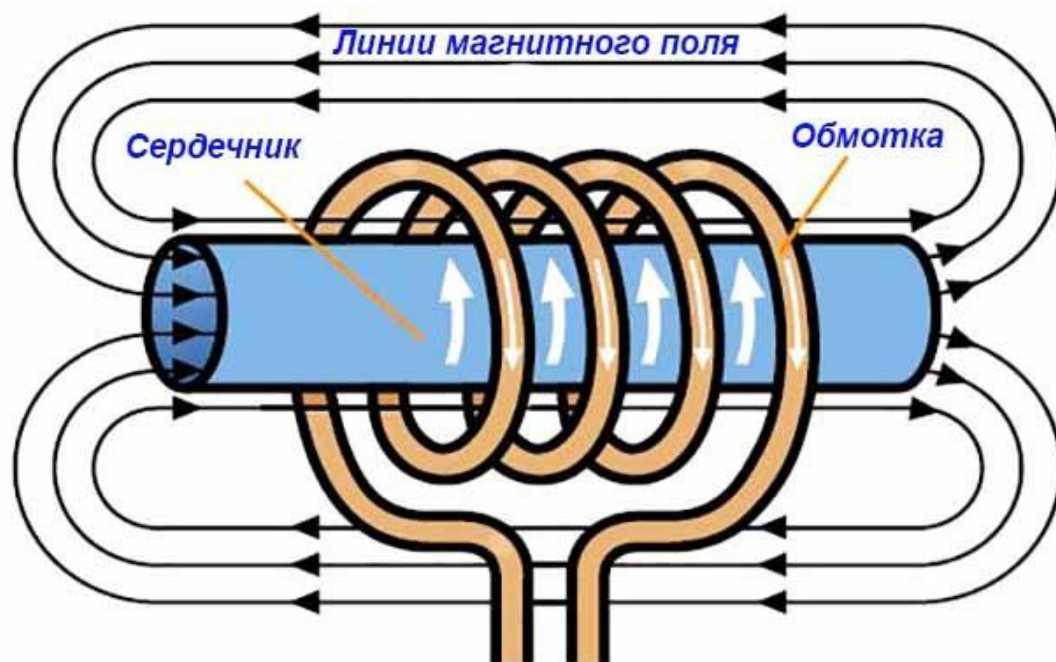


Рисунок 1.1 – Принцип индукционного нагрева

«Метод индукционного нагрева основан на использовании ряда законов, которые, с одной стороны, определяют функцию распределения плотности тока и мощности внутренних источников по сечению нагреваемого тела, а с другой — лежат в основе технических устройств, позволяющих управлять этими распределениями в соответствии с технологическими требованиями. К таким законам относятся: закон электромагнитной индукции; закон Ома; закон Джоуля-Ленца, а к явлениям — явления поверхностного эффекта; эффекта близости; кольцевого эффекта; эффекта паза, являющиеся следствием закона электромагнитной индукции» [2].

К преимуществам индукционного нагрева относятся:

- Высокоскоростной нагрев любого проводящего материала
- Возможность нагревать изделия в защитной атмосфере (газа, жидкости, вакууме)
- Нагрев через защитную камеру диэлектрических материалов (стекло, цемент, пластмасса, дерево и т.д.)

- Получение сверхчистых сплавов в небольшом количестве за счет магнитно гидродинамических усилий (плавка в электромагнитном тигле, левитационная плавка)
- Чистота процесса, поскольку процесс нагрева ведется с помощью электромагнитного излучения, загрязнения воздуха сводятся к минимуму из за отсутствия продуктов горения
- Возможность легко проводить локальный и избирательный нагрев, равномерно нагревать изделия сложной конфигурации при изготовлении индуктора особой формы
- Идеальный метод для проведения поверхностной закалки, так как нагрев идет в верхних слоях изделия
- Простота автоматизации и управления циклами нагрева и охлаждения
- Эффективное потребление энергии

## **1.2 Индукционная пайка**

Под индукционной пайкой подразумевается процесс соединения материалов с использованием припоя, для соединения двух плотно прижатых друг к другу изделий без плавления основного металла под воздействием электромагнитного поля. Индуцированное тепло расплавляет присадочный металл, который затем вытягивается между основными материалами за счет капиллярного воздействия.

Технологические процессы индукционной пайки возникли и развиваются одновременно с другими процессами высокочастотного нагрева металлов. «Широкое внедрение индукционной пайки обусловлено такими ее преимуществами по сравнению с печной и газопламенной пайкой, как более высокая производительность, менее тяжелые условия труда, обеспечение четкой фиксации взаимного положения паяемых деталей, пониженный расход припоев и флюсов, возможность механизации и автоматизации процесса, получение более плотных швов с высокими эстетическими свойствами. В ряде случаев применение индукционного нагрева позволяет повысить прочность паяных соединений:

например, трубопроводы из нержавеющей стали, паяные при высокочастотном нагреве, имеют предел выносливости на 30% выше, чем выполненные газопламенной пайкой. Перечисленные достоинства обеспечивают индукционной пайке применение во всех отраслях машиностроения, особенно в инструментальном производстве, где 80% металлорежущего и горнобурового инструмента с припаянными твердосплавными режущими элементами проходит индукционную пайку, а также в электротехнической промышленности, широко использующей паяные соединения в медных токопроводах» [4].

### **1.3 Контролируемые атмосферы**

«Контролируемые атмосферы предназначаются для устранения образования оксидов при нагреве, а так же восстановлению уже имеющихся окислов на основном металле и припое, чтобы улучшить смачивание и затекание припоя в зазоры» [24].

«При пайке в контролируемой атмосфере необходимо заранее удалять с поверхности толстые оксидные слои и другие загрязнения. При пайке с флюсом этого можно избежать. При очистке загрязнений следует опираться на специфические свойства паяемого материала. В основном контролируемые атмосферы используются при печной пайке, тем не менее, они нашли применение и в индукционной пайке и в пайке сопротивлением. В случае применения только контролируемой атмосферы, детали получаются абсолютно чистыми и не требуют дальнейшей очистки после пайки. Так же, контролируемые атмосферы применяют и с использованием флюса. Они положительно влияют на продолжительность его действия, а очистка изделий сводится к минимуму» [24] .

Атмосферная система для индукционного нагрева была разработана в качестве альтернативы нагреву на воздухе, что имеет недостатки, связанные с образованием окалины на поверхности металла. Выбор атмосферы и скорости потока определяется в основном следующими факторами: состав и состояние поверхности нагреваемого и кованого материала, конструкция, размер и количество индукционных катушек (индукторов) и циркуляция атмосферы



внутри катушек, расстояние между индуктором (или последним индуктором, если используется более одного) и ковочным прессом, наличие и стоимость оборудования и атмосферных газов.

Характерным преимуществом использования контролируемых атмосфер является устранение образования оксидов и окалин на всей поверхности изделий, соответственно можно производить окончательную механическую обработку перед процессом пайки. Некоторое оборудование и установки очень капризны и сильно изнашиваются и загрязняются (вакуумные установки, муфельные печи) при попадании флюса, поэтому при пайке в таких системах очень важно избегать его применение.

К недостаткам процесса пайки в газовой среде следует отнести необходимость применения дорогостоящего и сложного оборудования для получения и контроля газовых сред и взрывоопасность некоторых газов, применяемых для пайки.

Пайка в контролируемых атмосферах имеет широкое применение для получения высококачественных соединений. Пайкой в печи с использованием контролируемых атмосфер можно соединять изделия и детали с большим весом, которые выполнены из различных материалов.

Согласно [19] «Смеси некоторых атмосфер с воздухом взрывоопасны в широком диапазоне температур. Перед нагревом из реторты, содержащей любую из таких атмосфер при температуре ниже  $700^{\circ}$ , необходимо тщательно удалить воздух. Например, смесь водорода с воздухом при содержании водорода в пределах от 4 до 75% взрывоопасна. Исползованную атмосферу следует или сжигать или быстро разбавлять воздухом путем соответствующей вентиляции» [19].

Состав защитной атмосферы выбирается в зависимости от материала паяемых деталей, их состояния, типа припоя и имеющегося оборудования для получения газа. Наличие на поверхности металла окислов марганца, хрома или кремния затрудняет растекание припоя в атмосфере, содержащей CO и H<sub>2</sub>, а при

суммарном содержании в сплаве более 2% Mn, Cr и Si делает, например, пайку медью без дополнительного применения флюса вообще невозможной.

Атмосфера должна быть совместима с нагреваемым материалом. Например, атмосфера на основе азота и его смесей совместима с углеродистыми и низколегированными сталями. В большинстве случаев цель заключается в том, чтобы уменьшить или устранить образования окалина во время нагревания с использованием защитной атмосферы.

Поковочный материал обычно имеет форму круглых или квадратных прутков и заготовок. Заготовки могут быть вырезаны из прутков при комнатной температуре (холодная резка) перед нагревом дляковки или при высокой температуре (горячая резка) после нагрева. Защитная атмосфера не должна применяться к материалу, у которого уже имеется окалина, до нагрева дляковки, так как это не приведет к удалению окалины.

Использование защитной атмосферы при нагреве дляковки также не рекомендуется для материала с дефектами на поверхности металла. Эти стальные заготовки нуждаются в окислительной атмосфере, чтобы сформировать окалину, которая в конечном итоге удалит поверхностные дефекты из кованной детали. После снятия окалины поверхность имеет приемлемое качество.

Кованые стержни обычно перемещаются через валки, установленные снаружи и / или между индукторами. Большинство установок индукционного нагрева для баров имеют более одного индуктора. Заготовки можно проталкивать на рельс с водяным охлаждением через индуктор (и) установки индукционного нагрева. Выходящие нагретые заготовки передаются на ковочный пресс автоматически или вручную с помощью щипцов.

При высоких температурах оксиды некоторых металлов становятся неустойчивыми, в процессе нагрева они распадаются, выделяя при этом кислород. При длительном времени нагрева, выделяющийся кислород полностью улетучивается и, соответственно, оксидная пленка распадается. У оксидов серебра  $\text{Ag}_2\text{O}$  и золота  $\text{Au}_2\text{O}_3$  относительно небольшая температура разложения, порядка 160 – 300°C.

Тем не менее, большая часть металлов имеет оксиды, которые разлагаются при температурах превышающих температуру плавления основного металла. Таким образом, добиться полного удаления оксида на поверхности, увеличив температуру, не получится. Поэтому, следует уменьшить концентрацию кислорода другими технологическими способами.

Технологические приемы, с помощью которых уменьшают содержание кислорода в паяемой среде вокруг изделия, сводятся к тому, что атмосферу вокруг паяемых объектов заполняют или продувают инертными или восстановительными газами. При прохождении над поверхностью паяемых деталей, инертные газы привлекают кислород. У восстановительных сред, уменьшение содержания кислорода происходит за счет взаимодействия активных компонентов этой среды.

Водород, является одним из основных восстановительных газов, используемых при пайке в контролируемых атмосферах. Изредка используют оксид углерода и водород или другие газовые среды с их содержанием. При взаимодействии восстановительной среды с оксидом паяемого металла, на поверхности начинает образовываться углекислый газ или водные пары.

Для пайки металлов с контролируемой атмосферой помимо водорода, применяют так же диссоциированный аммиак, генераторные газы, с различным содержанием водорода и углекислого газа. Восстановительные свойства этих смесей определяют содержание водорода и оксида углерода. Существенное воздействие на восстановительные свойства смесей также оказывает степень очистки от водяных паров. Сухой и очищенный от кислорода водород имеет высокие восстановительные свойства. Из-за взрывоопасности в процессах пайки он имеет ограниченное применение, поэтому его используют только в случаях , когда другие среды не способны обеспечить должного качества паяных образцов , например, для пайки высоколегированных сталей и сплавов.

Так же применяют азотно-водородную смесь, при определенном соотношении она не взрывоопасна и дешевле, чем чистый водород. Однако с восстановлением других оксидов металла, входящих в состав легированных

сталей, например, оксид кремния и марганца, они справляются слабо. Поэтому нержавеющие и жаропрочные стали в таких восстановительных смесях практически не паяются.

Оборудование для пайки с применением восстановительных сред состоит из двух частей, рабочей камеры для нагрева и пайки деталей, а так же устройства для подготовки газовой среды.

Для получения восстановительной атмосферы применяют различные схемы оборудования, основное требование к ним – газовая среда должна быть максимально чистой.

Помимо реакции восстановления оксидов, нагрев в атмосфере водорода сопутствует такому нежелательному процессу, как растворение водорода в основном металле и припое. Поэтому медь в таких атмосферах почти не паяют.

Растворение водорода на основном металле меди, его сплавов и расплаве медных припоев вызывает охрупчивание, а так же образуются поры при кристаллизации припоя. Причем, в процессе пайке насыщение расплава водородом меньше, чем при сварке. Это объясняется тем, что температура при пайке ниже, чем при сварке.

При пайке нержавеющих и жаропрочных сталей и сплавов применяется среда фторида аммония при температуре 800°C. При разложении фтористого аммония происходит распад на фтористый и свободный водород. При этом фтористый водород диссоциирует с оксидом металла и одновременно восстанавливает его. При применении атмосферы из фтористого аммония или фторбората аммония необходимо достигать их полного разложения. Фтористый аммоний образуется из продуктов распада солей фтористого водорода и аммиака. Он осаждается на поверхности металла, препятствуя процессу смачивания, а так же загрязняя рабочие поверхности оборудования и трубопровода. Процесс полного распада фтористого аммония происходит при температуре 600—800°C, а фторбората аммония в диапазоне 850—950°C.

У продуктов распада фторбората калия и непосредственно у самого фторбората калия высокая флюсующая активность. Введение в камеру пайки

трехфтористого бора из баллонов позволяет применять его в качестве активной добавки к нейтральным средам. Данные смеси предоставляют возможность осуществления пайки нержавеющей сталей и некоторых жаропрочных сплавов при температуре, находящейся в пределах 1000-1200°C.

Кислород в таких смесях содержится в процентном соотношении 0,1-0,5% и выше. Избавиться от кислорода, содержащегося в газах возможно двумя способами: каталитическим способом или химическими поглотителями. В качестве последнего возможно использование жёлтого фосфора, губчатой меди, титановой губки и пр.

Каталитический способ очистки заключается в следующем: кислород соединяется с водородом за счёт действия катализатора и образует пары воды, впоследствии удаляемые осушкой. В качестве каталитических металлов с наилучшими свойствами возможно применение платины и палладия, однако использование данных металлов для очистки атмосфер является экономически невыгодно. Для очистки азотоводородных атмосфер применялся такой металл, как дунит, обладающий высокими каталитическими свойствами. Этот металл является наиболее дешёвым и доступным. Каталитический способ очистки позволяет не только удалить примесь кислорода из газа, но и обеспечить растекание серебряных припоев по поверхности легированных сталей при температурах 750-800°C.

Газообразные флюсы. Газообразные флюсы относятся к активным газовым средам. Их применяют как отдельно самостоятельные среды, так и используют добавками к восстановительным и нейтральным атмосферам. Продукты распада на основе фторидов и хлоридов металла являются активными флюсами. Фторборат калия  $\text{KBF}_4$ , фтористый аммоний  $\text{NH}_4\text{F}$ , фторборат аммония  $\text{NH}_4\text{BF}_4$  являются начальными продуктами для получения таких флюсов.

Обязательно применение сухих атмосфер, в которых ограничено содержание паров воды (не более 0,1%). Это требуется для того, чтобы не допустить сильное обезуглероживание при пайке сталей. Но избежать тотальное обезуглероживание не предоставляется возможным. В атмосфере, содержащей

водород, при нагреве металла помимо обезуглероживания осуществляются следующие процессы: растворение водорода в расплавленном припое, основном металле, возникновение на поверхности металлов гидридов и пр.

Очистка газа от примесей. Высокая температура нагрева является существенным недостатком для удаления оксидной пленки в газовой среде. Для углеродистой стали 1100—1150°C, для легированной стали 1150—1200°C и для жаропрочных сплавов 1200—1220°C. Значительное содержание примесей кислорода и паров воды негативно влияют на восстановительные свойства газовых сред. Поэтому при закачивании газа необходимо проводить тщательную очистку от кислорода и водяных паров. Это позволяет снизить температуру пайки и повышает активность восстановительной среды. Для осушения газа используют адсорбенты по типу алюмогеля и силикагеля. Температура точки росы силикагеля составляет -40°C, а алюмогеля -60°C. Для более эффективного осушения, газ дополнительно пропускают через оксид фосфора, смешанный с минеральной ватой. При этом, температура точки росы составляет -80° С. Еще более низкую температуру образования точки росы (до —100°C) обеспечивают палладиевые катализаторы нанесенные на окись алюминия или носители на его основе.

Так же одновременно с водородом и диссоциированным аммиаком обширное распространение при пайке имеют газовые среды, которые являются продуктами неполного сгорания высококалорийных газов в смеси с воздухом. Для приготовления таких газовых сред используют природный газ, генераторный газ, пропан, а также другие горючие газы.

Изменение соотношения горючего газа и воздуха в сжигаемой смеси позволяет обеспечивать регулирование состава газовой атмосферы. Атмосферы, которые получаются в результате сжигания горючих газов при наличии катализаторов и при высокой температуре, обладают наиболее эффективными восстановительными свойствами. Такие газовые смеси называются эндотермическими атмосферами, так как в данном случае при сжигании осуществляется поглощение тепла.

Для разложения углеводорода при неполном сгорании необходимо подобрать соответствующую температуру катализатора и состав газовой среды. Азот, водород и окись углерода являются основными элементами такой среды.

Аммиак, который используют для изготовления такой среды, транспортируют в баллонах в сжиженном состоянии. При пайке, расход одного баллона аммиака равен расходу 19 баллонам водорода с той же емкостью, под давлением  $150 \text{ кгс/см}^2$ . Исходя из этого, можно сделать вывод, что использование аммиака экономически выгоднее, а так же менее опасно, чем использование водорода.

Во всяком случае, безопасной атмосферой диссоциированный аммиак считать нельзя из-за большого содержания водорода. Для уменьшения концентрации водорода, диссоциированный аммиак частично сжигают в смеси с воздухом.

Более эффективное получение азотно-водородных смесей с низкой концентрацией водорода, обеспечивается посредством добавления к азоту малого количества водорода. С точки зрения рентабельности, это имеет смысл, если азот производят на предприятии в качестве побочного продукта.

Недостатком такого способа является высокое содержание кислорода и влаги в газе, поэтому азотно-водородную смесь, полученную таким путем, осушают и очищают, или используют для пайки низкоуглеродистых сталей.

«Пайка в среде инертных газов обычно производится в контейнере при постоянной продувке. В качестве нейтральных атмосфер при пайке применяют инертные газы: аргон, гелий и азот» [5].

При пайке титана, вольфрама, а так же высокоуглеродистых и жаропрочных сталей используют аргон любого марки. Для пайки титана предпочтительнее использовать аргон более высокого класса марки А, для сталей в основном используют марки Б и В, при этом он не требует дополнительной очистки от примесей и осушения.

Для удаления из камеры пайки кислорода и других газообразных продуктов распада образующихся при диссоциации оксида, ее продувают аргоном с

избыточным давлением. При пайке с непроточной атмосферой в камере, процесс диссоциации может прекратиться в связи с повышением парциального давления кислорода возле поверхности паяемого изделия.

В целях экономии дефицитного газа, такие как аргон и гелий, их можно заменить более распространенным дешевым газом – азотом. Азот можно использовать в качестве нейтральной атмосферы для пайки стали, меди и их сплавов при сравнительно низких температурах: для меди 750—800°C, для стали до 1200°C. Недостатком азота, как контролируемой атмосферы для пайки, является образование на поверхности металла хрупких нитридов. Это негативно влияет на структуру тонкостенных деталей, которые при этом теряют прочностные характеристики.

Бесфлюсовую пайку с применением разреженного газа при давлении ниже 105 Па называют пайкой в вакууме. При создании вакуума в замкнутом объеме печи или контейнера с определенной степенью разрежения, можно добиться условия, при котором парциальное давление кислорода станет меньше, чем упругость диссоциации окислов. При таком условии оксиды диссоциируют и их повторное образование при пайке ограничено из-за отсутствия кислорода в печи или контейнере. Способ пайки в вакууме обычно применяют для соединения различных металлов (медь, вольфрам, никель, титан, высоколегированные и жаропрочные стали). Сплавы, которые содержат большое количество алюминия или хрома, для пайки в низком или среднем вакууме, требуют дополнительного использования флюса. Это объясняется высокой стойкостью оксидов алюминия и хрома. Они имеют достаточно маленькое давление пара, и процесс их испарения начинается при температурах, близких к температуре плавления.

Основными преимуществами пайки в вакууме являются высокая плотность металла шва, хорошее качество соединения и эстетический вид. Главными недостатками этого способа является сложное дорогостоящее оборудование и достаточно длительное время процесса. Это обусловлено, тем, что поддержание низкого содержания кислорода, которое требуется для обеспечения разложения окислов на поверхности изделий, реализуется вакуумными насосами. Для пайки



металлов и сплавов со стойкими оксидами, которые содержат титан, хром, алюминий, требуется создавать более высокий вакуум. Пайка в вакууме малоуглеродистых сталей, меди, олова и их сплавов осуществляется без особых проблем. Для пайки легированных сталей при температуре 1150—1200°С необходимо сложное оборудование с двухступенчатой откачкой. Что бы реализовать пайку меди в условиях вакуума при температуре примерно 1000°С необходимо использовать форвакуумный насос. Поэтому, для пайки легированных и жаропрочных сталей и сплавов тугоплавкими припоями используют такой технологический способ, как лужение медью.

Еще одним вариантом создания атмосферы в вакуумной камере, содержащей низкую концентрацию кислорода, заключается в предварительной продувке камеры восстановительным или инертным газом, желательно использовать газ с минимальным содержанием кислорода. За счет использования такого способа, при последующей откачке, концентрация кислорода в вакуумной камере сводится к минимуму. С помощью этого технологического приема возможно выполнить пайку в вакууме титановых и жаропрочных сплавов. При этом следует учитывать, что применение дорогостоящих газов для продувки камеры является целесообразным если другие газы оказывают негативное влияние на металл.

Процесс диссоциации не единственный способ удаления оксидной пленки с паяемых деталей при вакуумной пайке. Исходя из теоретических данных, для пайки таких металлов как титан и хром, необходимо чрезвычайно высокое значение вакуума, которого невозможно добиться на практике (например, для разложения оксида титана  $TiO_2$  требуется степень разрежения  $10^{-28}$  мм рт. ст.). Хотя известно, что пайку титана и его сплавов выполняют в среднем вакууме при температурах 1100 — 1200°С. Дополнительно с процессом диссоциации протекают и другие процессы, которые способствуют удалению оксидов при более высоких парциальных давлениях кислорода в среде.

Процессом, способствующим удалению оксидной пленки при пайке, является сублимация оксида и его полное растворение на основном металле и

припое. При высоких температурах пайки оксид переходит из твердого состояния в газообразное, минуя жидкое и испаряется. Кислород интенсивно растворяется за счет часто используемых припоев на основе меди и серебра. Серебро способно растворить 2 атомн. % кислорода при температуре 1000°C. Медь в жидком состоянии растворяет 5,7 атомн. % кислорода при 1200°C. Наиболее интенсивно оксидная пленка растворяется в титане при температуре 700°C и выше.

Пайку в вакууме рациональней всего использовать для малых деталей, или небольшой группы деталей. Для крупногабаритных изделий необходима длительная откачка воздуха из камеры, что бы создать требуемую глубину вакуума, а это увеличивает время пайки. Поэтому ученые занимаются разработкой новых различных вариантов пайки в контролируемой атмосфере.

Например, в источнике [29] при пайке алюминиевых сплавов в контролируемой среде аргона проведены исследования физико-химических процессов, которые происходят при формировании паяных швов. «Установлены закономерности влияния на характеристики качества паяных соединений состава газовой среды, определены температурно-временные режимы протекания термической дегазации материала изделия, камеры, ограничивающей объем пайки, сборочно-паяльных приспособлений и параметры нагрева, которые обеспечивают необходимые и достаточные условия для формирования соединений высокого качества». Такие условия достигаются в процессе нагрева деталей с нахождением титана, который выполняет функцию геттера в инертной среде. На бывшей кафедре пайки ТПИ в качестве геттера использовали титановую губку.

Согласно источнику [29] «Результаты исследований процесса дегазации материала паяемого пакета, паяльной камеры, приспособлений для сборки под пайку и геттера, с учетом полученных данных, по формированию паяных швов деталей пластинчато-ребристых теплообменников, при подготовке к пайке которых использовали растворы экологически чистых очистителей, а также микроструктуры и прочности паяных швов, математической модели нагрева

крупногабаритных пластинчато-ребристых теплообменников разработан новый технологический процесс их пайки» [29].

Если сравнить характеристики процесса вакуумной пайки алюминия и характеристики разработанной технологии, при равных параметрах, и схожих показателей качества, пайка в аргоне, за счет сокращения термического цикла обладает наибольшей производительностью, меньшими энергозатратами, не требует использования припоев со сложным хим. составом, а так же не требует периодической очистки оборудования от конденсирующего магния для образования высокого вакуума.

В работе [25] также рассмотрены вопросы пайки пластинчато-ребристых алюминиевых теплообменников в контролируемой среде аргона. В отличие от предыдущей работы автор подошел к проблеме с другой стороны. Различными независимыми методами он изучал влияние предварительной подготовки поверхности паяемых сплавов алюминия на качество соединений пластинчато-ребристых теплообменников, которые были получены пайкой в контролируемой среде аргона. При исследовании выявлено отсутствие существенного влияния рекомендуемых щелочных и кислотный способов подготовки на характеристики качества пластинчато-ребристых алюминиевых теплообменников при рассмотрении возможностей обеспечения максимального качества. В связи с этим при выборе того или иного способа необходимо руководствоваться нормами технологической и экономической обоснованности. Щелочной способ не гарантирует высокоэкологичный чистый процесс подготовки, однако является наиболее предпочтительным для подготовки поверхности деталей.

Преимущества растворов кислотных очистителей заключаются в слабом пенообразовании и отсутствии образования грязи на поверхности алюминия при их использовании. Это обусловлено достаточно низкой скоростью удаления поверхностного слоя металла при полной очистке поверхности от окислов, которое обеспечивает смачивание поверхности металла расплавленным припоем.

В результате проделанной работы были получены результаты, которые позволяют рекомендовать для подготовки изделий пластинчато-ребристых

теплообменников к пайке в контролируемой среде аргона 10% раствор кислотного очистителя "ЕС-Очиститель фасадов ФФ". При циклической коррекции формирования ванны для травления данный раствор, по сравнению с другими, сохраняет высокую активность при предварительной очистке под пайку. Так же были определены концентрация и температурно-временные параметры процесса, позволяющие удалять жировые загрязнения и окислы пленок с поверхности алюминия.

При проведенном анализе, можно сделать вывод, что ученые все так же интересуют проблемы бесфлюсовой пайки в контролируемых атмосферах. К примеру, одним из немногих видов исследования является замещение общепринятых составов газа, инертных, восстановительных и оксида углерода на новые модифицированные версии. В частности, в работе [29] велись исследования процессов пайки в атмосфере перегретого пара.

Принцип способа заключается в перегревании водяного пара, который подавали в специальный контейнер, где происходит процесс пайки. К преимуществам этого метода можно отнести то, что способ является бесфлюсовым, соответственно отпадает операция очистки деталей от остатков флюса, что уменьшает трудоемкость процесса. Так же отсутствие остаточного флюса увеличивает коррозионную стойкость паяемого металла.

Еще одним преимуществом этого способа является то, что водяной пар, применяемый в качестве теплоносителя, дешевый, безопасный и экологически чистый

Однако, как и оборудование для пайки в восстановительных атмосферах, разработанная установка содержит дополнительное устройство, которое позволяет получить перегретый водяной пар. Одним из научных исследований кафедры Пайки ТПИ являлось получение в замкнутой камере или печи активных и восстановительных атмосфер, где находилось изделие, которое нужно спаять. Как было сказано выше, для способов пайки в контролируемой атмосфере необходимо использовать дополнительные устройства для очистки и создания подходящей газовой среды. Для обеспечения соответствующей чистоты газовой

среды для различных способов, появляется ряд сложностей. Ранее разработанные способы контейнерной пайки в автозащитном газе и автовакуумной пайки имеют возможность обходиться без дополнительного оборудования.

При исследованиях самопроизвольной очистки поверхности металла от окислов за счет разложения газов в твердом металле был разработан ряд технологий автовакуумной пайки в условиях ограниченного подвода окислителя. Дальнейшие разработки по автовакуумной пайке развивались путем введения геттеров в герметизованный объем, которые связывают различные газы в химические соединения и снижают предельное давление для таких условий.

Титан, марганец и хром являются высокоактивными металлами и имеют наиболее высокие геттерные свойства при автовакуумной пайке. Проведя масс-спектральный анализ состава газовой среды в зазоре паяного соединения с введением геттеров, были выявлены низкие значения парциального давления кислорода, при достаточно высоком давлении слабоактивных и инертных газов.

Близкий по возникающим процессам к автовакуумному нагреву, является нагрев в замкнутой и полужамкнутой среде воздуха, а также разработанный в Германии способ контейнерной пайки углеродистых сталей в автозащитном газе.

Во время осуществления термического цикла пайки преобразование состава газовой среды в контейнере возможно сопутствует протеканию следующих процессов [30]: «1) расширением газов при нагреве, что при поддержании в системе постоянного давления приводит к уменьшению абсолютной концентрации газов, в том числе окислительных, 2) окислением материала контейнера и паяемых деталей, 3) десорбции газов и паров со стенок контейнера и с поверхности деталей, 4) термического разложения веществ, имеющих или специально введенных в контейнер, 5) термодиффузии, в результате которой более лёгкие газы концентрируются в зонах с более высокой температурой, 6) газовых и гетерогенных (твёрдое тело-газ, жидкость-газ) реакций со специально введенными активаторами, 7) изменения объема газов в результате этих реакций» [30].

Устойчивость оксидов характеризуется процессами разрушения и удаления оксидной плёнки с поверхности паяемых деталей. Наибольшей устойчивостью при нагреве обладают оксиды бериллия, магния, алюминия, цинка, титана, кремния, ванадия, марганца, хрома и фосфора и других элементов. Менее устойчивые оксиды имеют такие металлы как: железо, кобальт, никель, германий, олово, кадмий, вольфрам и сурьма. Наименьшей стойкостью отличаются оксиды металлов меди, свинца и благородных металлов. Поэтому для улучшения растекания и смачивания припоя следует обеспечивать хорошую активацию поверхности металлов с разным химическим составом, за счет контролируемой атмосферы обладающей разного рода восстановительными качествами.

Согласно [8] «Что, комбинируя различные способы изменения состава газовой среды, можно получить атмосферу в контейнере с различной степенью активности, в том числе и обеспечивающую разрушение сравнительно стойких оксидов. Так, удалось добиться смачивания поверхности коррозионно-стойкой стали латунию при бесфлюсовой пайке в контейнере с применением паров цинка, предположительно за счет проникновения латуни по дефектам оксидной пленки» [8].

Последующее совершенствование технологии пайки в среде, образующейся в объёме контейнера, заключалось в изменении вариации конструкции контейнеров. Осуществлялась разработка всевозможных технологических приёмов пайки в контейнерах, которые были герметизированы уплотнениями, не гарантирующие высокий уровень герметичности внутреннего объёма. Такие уплотнения представляют собой асбест, песчаные засыпки, комбинированные засыпки (песок и материалы, содержащие углеводород).

Основной объём контейнера заполняли легкоиспаряемыми веществами – цинком, марганцем и литием. Технологические методы, сущность которых заключается в применении процессов испарения веществ, нашли широкое применение в металлургической и химической промышленности. С исследованиями области вакуумного оборудования электронно-лучевых установок, создаются и внедряются новые технологические процессы нанесения

покрытий в промышленности, которые обладают уникальными свойствами получения металлов и сплавов высокой чистоты. С применением паровой фазы в процессах пайки, она позволяет значительно увеличить технологические возможности.

Помимо возможности нанесения различных покрытий, имеет место контролирование процессов смачивания, растекание и образования припоя в результате термического цикла пайки. Исследовано, что в насыщенных парах свинца значительно повышается уровень смачивания меди расплавленным свинцом. В высоком и низком вакууме смачивание нержавеющей стали различными припоями улучшается при наличии паров лития. Пары марганца в случае вакуумной пайки нержавеющей сталей повышают качество их паяемости.

#### **1.4 Индукционная пайка в контролируемой атмосфере**

Индукционная пайка может проводиться в любой атмосфере, в том числе и в вакууме.

В зависимости от атмосферы в камере пайки различают три разновидности этого способа:

1. Пайка с обыкновенной атмосферой с применением твердых флюсов.
2. Пайка в камере с защитными газообразными средами.
3. Пайка с вакуумированной камерой.

«Пайка с контролируемой атмосферой обеспечивает равномерность нагрева, точность поддержания температуры и времени выдержки, стабильность качества, легко поддается автоматизации, устраняет операции флюсования и последующей очистки. Нагрев паяемых деталей осуществляется в активной или нейтральной газовой среде, подвергнутой специальной очистке и осушению в инертной среде или в вакууме. Правильный выбор режима пайки позволяет совместить её с последующей термообработкой соединения» [5].

Способ индукционной пайки в контролируемой атмосфере быстро развивается и имеет ряд преимуществ:

- 1) получение высококачественного соединения;

- 2) повышение производительности процесса;
- 3) производство равномерного нагрева деталей, что способствует уменьшению их коробления;
- 4) контроль температуры в процессе пайки и времени выдержки деталей
- 5) выполнение одновременно нескольких спаев в одной детали или пайка за один прием партии деталей;
- 6) отсутствие необходимости применять твердые флюсы для пайки вследствие наличия атмосферы, удаляющей окислы металлов и предохраняющей детали от дальнейшего окисления при нагревании. Данное преимущество намного удешевляет производство. Индукторы установки индукционного нагрева могут быть спроектированы и изготовлены со специальным входом для защитной атмосферы (большинство индукторов старых установок индукционного нагрева не имеют этих входов). Большинство установок имеют последовательность индукторов.

Для использования защитной атмосферы в установке индукционного нагрева, содержащей несколько индукторов, которые не имеют специального входа для защитной атмосферы, пространство между последовательными индукторами должно быть исключено или закрыто, чтобы избежать воздействия нагрева горячих стержней или заготовок, передаваемых через индукторы, на воздух. Если конструкция, размер и количество индукционных катушек являются подходящими, зазор между индукторами можно устранить, прижимая индукторы друг к другу или устанавливая крышку между индукторами. Устранение пространства между индукторами приводит к «объединенному» расположению индуктора, подобно непрерывной печи.

Два способа введения защитной атмосферы в объединенные индукторы:

- 1) Через входное отверстие кожуха соединено с гибкой трубкой. Кожухи и входы кожуха устраняют зазор между соседними индукторами. Для более чем двух катушек оптимальное количество и расположение входов кожуха в установке для индукционного нагрева может быть определено таким же образом, как и положение входов в печи непрерывного действия.



2) Через относительно длинную впускную трубу из керамического и термостойкого материала, соединенную с гибкой трубкой. Трубка установлена на этом выпускном конце последнего индуктора и должна располагаться в верхней части камеры индуктора, где движущиеся входы или стержни не могут ее повредить.

Вход в кожух, соединенный с гибкой трубкой, считался более подходящим, чем вход в длинную трубку, потому что его было легче устанавливать и заменять. Движущиеся заготовки могут попасть во впускную трубу, а циклы нагрева-охлаждения могут повредить материал керамической трубы.

Зазор между индукционными катушками может вместить кожух / коробку входа атмосферы, которая изготовлена из термостойких крышек и прокладок, используемых для герметизации этого зазора. Пространство между катушками должно быть закрыто, если есть ролики, которые перемещают заготовки или стержни через индукционные катушки (индукторы). Входное отверстие кожуха выполнено из низкоуглеродистой конструкционной стальной полосы, а верхняя половина отделена от нижней половины изолирующей и уплотняющей прокладкой. Специальный жаростойкий герметик используется для герметизации крышки и впускного отверстия (отверстий) кожуха к индукторам.

## **1.5 Особенности пайки стали**

«Один или несколько слоев окислов разного рода состава и термической устойчивости появляются на поверхности стали в зависимости от их легирования, температуры, среды и длительности нагрева. На углеродистых сталях появляются упорядоченно три слоя окислов, которые отличаются содержанием кислорода:  $Fe_2O_3$ ;  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$ . Последний окисел сохраняет стабильность при температуре более  $560^{\circ}C$  и при остывании распадается на  $\alpha Fe + Fe_3O_4$ . На разного рода сталях упорядоченность, состав и структура окислов определяются не только процессами взаимодиффузии кислорода из газовой среды и легирующих элементов из внутренних слоев стали и ее поверхности, но и широкой областью однородности структуры указанных выше типов окислов в связи с существованием изоморфных

окислов типа  $Me_2O_3$  ( $Me - Fe, Ni, Co$ ), типа  $Me'Me''_2O_3$  ( $Me'' - Fe, Ni, Co; Me'' - Fe, Ni, Co, Cr, Ti, Al$ ) и типа  $MeO$  ( $Me - Fe, Ni, Co, Mn, Mg, Ti$  и др.)» [2].

«Перед пайкой для очищения поверхности деталей и припоя имеет место химический или механический способы. Механический способ подразумевает использование металлической щетки, наждачной бумаги, шлифовальные круги, дробеструйную и пескоструйную обработку. Те детали, которые подвергаются очищению резанием с эмульсией, только обезжиривают. Поверхность тонкостенных деталей при их массовом производстве очищают от окисной пленки травлением в водных растворах кислот. В водном растворе для травления низкоуглеродистой и углеродистой сталей возможно содержание 10-15% серной кислоты. Травление промывки в горячей проточной воде, нейтрализация в горячем растворе щелочи, промывка в горячей воде и сушка – являются составляющими процесса обработки в таком растворе» [2].

«Подготовленные под пайку детали хранят в сухом помещении при температуре не ниже  $16^{\circ}C$  в течение не более 48 ч, после чего требуется очистка поверхности стали. В полиэтиленовых мешках срок хранения может быть увеличен. Конструкционные стали при длительном хранении защищают от окисления лужением или путем гальванического покрытия медью или никелем. Стальные изделия собирают с требуемым зазором, определяемым составом припоя и способом пайки по нагреву» [2].

При укладке припоя около зазора, большое значение имеет шероховатость поверхности изделий, которая должна составлять:  $2,5 \div 0,63$  мкм;  $Rz = 20 \div 10$  мкм, а также необходимо, чтобы направление рисок соответствовало направлению затекания припоя. При укладке припоя в зазор, шероховатость не имеет значения.

«Общий нагрев изделия до температуры, которая преобладает над температурой полного расплавления припоя, выдержка и последующее охлаждение и составляют термический цикл пайки в печи. В том случае, если температура пайки превосходит точку  $A_{c3}$  паяемой стали, возникнет отжиг изделия с лишением исходных механических качеств. Для того, чтобы их

рекультивировать необходима дальнейшая термообработка. Использованию припоев, у которых температура пайки ниже точки А 4с1 0 для данной стали или лежащей между точками А 4с1 0 и А 4с3 0 отдается предпочтение. Но температура точки А 4с1 0 для сталей составляет 980°К. При пайке с такой температурой обеспечение припоями необходимых механических качеств паяного шва могут трудновыполнимо» [5].

«Припой на основе серебра, железа или меди, для которых диапазон температур составляет 800-1150°С, используются для пайки в условиях повышенной температуры углеродистых, низколегированных и высокоуглеродистых сталей. Не только серебряные, медные, никелевые припои, но и припои систем Cu-Ni-Si, Ni-Cr-Mn, Cu-Mn-Ni, Ni-P используются пайки коррозионно-стойких сталей в условиях повышенной температуры. Ввиду растрескивания и проникновения по границам зерен медно-цинковые припои, как правило, не используются» [2].

Высококачественная пайка припоями на основе серебра при температурах ниже рекристаллизации углеродистых и высоколегированных сталей осуществляется за счет уникальных свойств серебра. В качестве припоя чистое серебро практически не применяют. Использование серебряных припоев систем Ag-Cu-Zn, Ag-Cu-Zn-Cd, Ag-Cu-Sn, Ag-Cu-P, Ag-Cu-Mn, Ag-Cu-Li позволяют уменьшить содержание серебра и снизить температуру плавления припоя.

Главным недостатком таких припоев является их высокая стоимость. Запасы цветных материалов ограничены, поэтому одной из основных задач является их экономия [8]. Для пайки сталей иногда применяют чугунные припои и припои на основе железа, например Fe-Mn-C, Fe-Cr-Si-B, Fe- Mn-Cu-Ni-C-B-Si, Fe-Cr-Ni-B. Основным недостатком таких припоев является высокая температура пайки 1150 - 1250°С, которая приводит к пережогу металла, большому расходу энергии и высоким требованиям к материалам нагревателей и оснастки.

Главными преимуществами этого процесса пайки являются высокая производительность и степень механизации, но температура процесса пайки из чистой меди достаточно высокая, и составляет 1100-1150°С. Прочность литой

меди составляет 190МПа, а прочность паяных соединений чистой медью 350Мпа, такие показатели достигаются за счет растворения железа и контактного упрочнения. Прочность на срез составляет 150-170 Мпа, которая уступает прочности стали. Способ применяется только в массовом производстве, поскольку в единичном производстве это экономически не выгодно, исходя из расчетов затрат на защитный газ.

Широкое распространение для пайки сталей нашли припои на основе меди. Они обладают хорошими технологическими свойствами и не содержат дефицитных элементов. Одним из самых распространенных процессов является пайка медью в печах с восстановительной атмосферой.

Припои на основе меди систем Cu-Mn, Cu-Ni, Cu-Mn-Ni, Cu-Ni-Si-Fe-, Cu-Mn-Ni-Ag, Cu-Mn-Ni-Si-Fe-Co, Cu-Mn-Ni-Fe с добавками В, Li, Zn, Р, К, Na, Al и др. применяются для повышения прочности паяных швов и снижения температуры пайки.

«Медь с никелем образует ряд твердых растворов. Для увеличения жаростойкости, прочности при повышенных температурах в медно-никелевые припои вводят хром, марганец, железо, кремний и алюминий. При пайке в среде нейтральных газов или вакууме не происходит заметного растворения основного материала, что позволяет паять припоями Cu-Ni тонкостенные изделия» [5].

«Механические свойства сплавов Cu-Mn из-за распада  $\alpha$ - фазы с течением времени меняются, поэтому двойные сплавы редко применяются для пайки нержавеющей сталей. В тройных сплавах распад  $\alpha$  - фазы происходит намного медленнее. Учитывая, что никель способствует снижению окисляемости припоев в жидком состоянии и улучшению смачиваемости ими поверхности коррозионностойких сталей для основы припоев более пригодны сплавы Cu-Mn-Ni»[2].

Содержание фосфора в объеме 4-9% в сплавах меди обладают наибольшей жидкотекучестью и относительно низкой температурой плавления. Например, содержащийся фосфор в эвтектическом сплаве в объеме 8,25% позволяет плавиться этому сплаву при температуре, равной 707°C. При необходимости уменьшения

температуры плавления и повышения гибкости в эвтектический сплав меди с фосфором добавляют олово и цинк. При использовании для пайки сталей медно-фосфорных припоев возможно образование в паяном шве фосфидов железа, которые приводят к потере гибкости и хрупкости соединения. В данном случае применение таких сталей ограничено изделиями, которые не подвергаются вибрационным нагрузкам.

Покрыв паяемые поверхности стального изделия барьерным слоем, к примеру гальваническим путем: никелированием, меднением, - возможно получение гибких соединений. При этом приемлемой толщиной медного покрытия для пайки стали 12Х18Н10Т и меди М1 является 75 мкм. При применении меньших толщин образовывались фосфиды, а больших толщин не способствовало совершенствованию механических свойств шва.

Избежать появления фосфидов железа возможно с помощью удаления из шва легкоплавкой эвтектики Cu-P. Эвтектика вытесняется в галтель и фосфор, который остался в соединении, создает обособленные включения, таким образом излом паяного соединения является пластинчатым. Добавив в припой системы Cu-P никель возможно провести улучшение свойств шва. Предотвращение появления сплошной прослойки фосфидов добиваются путем добавления никеля в объеме 4-15%, однако в данном случае в значительной степени увеличивается температура пайки. Аналогичный припой марки ПМФН 8,5-8,5 имеет меньшую температуру плавления (630-650°C), однако при этом обладает низкой прочностью.

Сплавы системы медь-цинк (латуни) имеют широкое применение в качестве припоев для пайки стали. Содержание цинка в латуни имеет значительное влияние на её механические свойства. Прочность и гибкость латуни увеличивается с повышением содержания цинка до 30-32%. Последующее повышение содержания цинка уменьшает гибкость, а с повышением содержания цинка более 45% уменьшается и прочность. Это происходит из-за высокого объема  $\gamma$  и особенно  $\gamma_2$  фазы. По этой причине наибольшее распространение среди двухкомпонентных латунных припоев получили Л65 и Л68. Использование припоев, которые содержат

большое количество цинка (ПМЦ54, ПМЦ48, ПМЦ36), имеет ограничение по пайке изделий, не испытывающих ударные нагрузки, изгиб и вибрацию.

При введении в двухкомпонентные латуни различных легирующих элементов, возможно расширение технологических возможностей применения медно - цинковых припоев и паяемых материалов. При использовании железа, алюминия, марганца, никеля в качестве легированных элементов улучшают теплостойкость латуни и ее механические свойства. Лучшие технологические свойства имеют латунь, легирующая оловом и кремнием, они так же обеспечивают высокую герметичность и плотность паяного шва.

Механические качества латуни имеют возможность быть улучшенными за счет легирования никелем. Существуют определенные виды припоев Cu-Ni-Zn, которые содержат никель в объеме 3-10%. Наиболее прочные соединения по сравнению с пайкой двухкомпонентной латунию дает сплав: 45-47%Cu, 5 043-45%Zn, 10%Ni. Такой сплав называется "нейзельбер".

Латунь может относиться к определенному структурному классу. При содержании того или иного легирующего компонента для определения класса используется коэффициент Л. Гийе. Для никеля коэффициент Гийе, равный -1,5, является единственным с отрицательным значением. Это можно описать так: присадка никеля эквивалентна снижению уровня содержания цинка, а именно фаза образуется в том случае, если цинка содержится больше.

Препятствием при пайке деталей с достаточно широкими зазорами (0,6 мм и более) выступает преобладающая микротекучесть латуни. По этой причине прогрессируют требования к сборке. Данный недостаток можно устранить добавляя в припой компоненты, которые обладают способностью расширять температурный интервал плавления. Таким компонентом может выступать никель. Добавлением никеля можно добиться предотвращения вытекания латуни из широких зазоров за счет расширения температурных границ плавления латуни.

Так как никель имеет большее сходство с кремнием, чем с железом, рассмотрим его добавку в латунь. При добавлении в латунь кремния, который позволяет снизить уровень испарения цинка при нагреве под пайку, снижается

гибкость и устойчивость паяного соединения в результате появления на границе шва прослойки хрупкого химического соединения железа с кремнием.

В том случае, когда в припой вводят латунь, содержащую 0,5% кремния и 2% никеля, кремний вступает в химическую реакцию с никелем, соединение не образует интерметаллидов по границе шва.

Добавление в латунь кремния как правило составляет до 1%, при этом в значительной степени уменьшается скорость испарения цинка при нагреве латуни. В отношении вопроса о том, как выполняется механизм действия кремния имеются разного рода гипотезы:

- 1) уменьшение коэффициента диффузии цинка,
  - 2) образование плотной защитной плёнки оксидов на поверхности припоя, непроницаемой для цинка,
  - 3) образование боросиликатов, всплывающих на поверхность припоя.
- Известно, что при нагреве в атмосфере гелия латуней, содержащих кремний, скорость испарения цинка не снижается.

Совместное легирование бором 0,1-0,3% и кремнием 0,75-0,9% позволяет применять латуни для пайки коррозионно-стойких сталей.

«Коэффициент Гийе для кремния равен +10 поэтому введение кремния в больших количествах охрупчивает латуни и паяные соединения получаются хрупкими. Кроме того, при напайке сталей латунью, легированной кремнием, в контакте твёрдой и жидкой фаз образуется хрупкая прослойка интерметаллида Fe Si вследствие большого сродства атомов железа и кремния. При этом высвобождающиеся атомы углерода образуют включения графита. Поэтому при напайке сталей латунью легирование последней кремнием необходимо ограничить, не более 0,3% кремния. Легирование марганцем сплавов Cu-Zn повышает прочность и снижает температуру их плавления. Так, припои, содержащие марганец в количестве 10-20%, полностью расплавляются при температурах 850-900°C [8,9]. Однако, при содержании марганца около 20% наблюдается снижение пластичности» [16].

Добавки олова понижают температуру плавления латуни, повышают

коррозионную стойкость в морской воде и увеличивают жидкотекучесть и растекание припоя. Температура плавления латуни, содержащей 10%Sn, 810°C [5]. Введение олова позволяет вести пайку при незначительном перегреве от температуры полного расплавления припоя (температуры ликвидуса) [14]. Однако олово в больших количествах также охрупчивает латуни.

Снизить температуру плавления медно-цинковых припоев можно легируя их индием в количестве 1-5%. При этом механические характеристики припоя и паяного шва остаются на высоком уровне. Сплавы, содержащие до 34% Zn и 5%In, имеют однофазную ( $\alpha$ -фаза) структуру [18].

При специальном легировании припоя можно улучшить совместимость припоев с паяемым материалом. Например, в припой вводят легирующие химические элементы, имеющие высокое химическое сродство с паяемым материалом. Учитывая, что графит удовлетворительно смачивается титаном, алюминием, кремнием, бором, легируя латуни вышеперечисленными элементами, можно улучшить смачивание чугунов и высокоуглеродистых сталей. Так припой для пайки чугуна ЛОМНА содержит 0,2-0,6% Al.

Для увеличения теплостойкости паяного соединения в латунные припои, например при пайке тяжело нагруженного составного твердосплавного инструмента, вводят хром. Эвтектика Cu-Cr содержит 8,4% Cr и температура её плавления 1075°C.

Широко применяют при пайке сталей латуни, легированные двумя и более элементами, особенно для пайки тяжело нагруженных изделий. Применение сложнолегированных латуней позволяет снизить температуру нагрева при пайке и, одновременно, увеличить прочность соединения. Методами векторной оптимизации и многомерного анализа в ИЭС им.Е.О.Патона исследован ряд составов припоев систем Cu-Zn-Mn-Si- Zr, Cu-Zn-Mn-Si-Sn. Полученные результаты позволили разработать припои с температурой плавления не выше 840°C, обеспечивающие высокие механические свойства паяных соединений. Оптимальный состав припоя, обеспечивающий максимальную прочность соединения Cu-34Zn- 9,5Mn-0,8Si-3Sn, вес.%. Температура пайки таким припоем



826°C.

## 1.6 Особенности пайки меди и его сплавов

Чистая медь, в составе которой находится небольшое количество других различных химических элементов, характеризуется высокими значениями тепло- и электропроводности. Под воздействием атмосферы медь пассивируется, то есть поверхность переходит в неактивное или пассивное состояние. Связанно это с образованием на ее поверхности защитной пленки, которая защищает металл от коррозии. В состав этой пленки входит химическое соединение  $\text{Cu}_2\text{O}$  (оксид меди). Прочность меди составляет около 240 МПа, при этом у нее высокие пластические характеристики, относительное удлинение достигает 45—50%. Пластичность меди зависит от содержания примесей. У меди марки М00, минимальное количество примесей, поэтому ее пластичность составляет около 62%. Прочностные характеристики меди уменьшаются при повышенных температурах, но возрастают пластические. Пластичность меди не понижается при низких температурах, это является одним из ее ценных качеств.

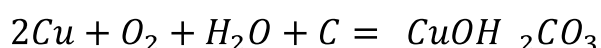
Прочность меди имеет высокие характеристики, но их постоянно стремятся повысить. Помимо этого, физические свойства меди не всегда удовлетворяют потребности конструкторов. Поэтому медь целенаправленно легируют различными компонентами, в результате чего образуются ее сплавы. Сплавы меди применяются в различных отраслях промышленного производства. Они применяются для изготовления изделий, которые используются при повышенных и пониженных температурах.

Неразъемные соединения меди и ее сплавов возможно получить как сваркой, так и пайкой. Пайка меди и ее сплавов может осуществляться всеми известными вариантами. Тем не менее, каждый сплав имеет свой более подходящий для него способ получения соединения пайкой. В зависимости от стойкости оксидной пленки  $\text{Cu}_2\text{O}$  различных сплавов меди и легкоиспоряемых добавок (цинк и др.), определяется способ нагрева, активации поверхности и прочие технологические параметры пайки меди.

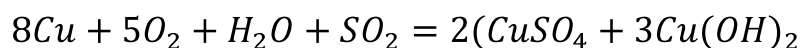
Некоторые элементы припоев для пайки меди образуют с ней хрупкие интерметаллиды. Медь и медные сплавы подвержены водородной коррозии (водородной хрупкости), которая в последствии резко снижает ее пластические свойства. А в некоторых случаях, при использовании жидких припоев, медь и ее сплавы хрупко разрушаются. Некоторые сплавы меди имеют свойство давать трещины при горячей обработке давлением при температурах порядка 850-1150°C. Такое явление называется - краснеломкость.

При пайке, на поверхности сплавов меди появляются оксиды, которые в свою очередь делятся на две группы: 1) легкоудаляемые; 2) трудноудаляемые.

В группу с легкоудаляемыми оксидами входит сама медь, различной степени чистоты, а так же ее сплавы, которые содержат: марганец, свинец, цинк, фосфор и никель. При нагреве на воздухе, на поверхности меди образуется оксидная пленка, с реакцией [3]:



При наличии в атмосфере оксида серы SO<sub>2</sub> необходимо учитывать реакцию [4]:



При взаимодействии верхнего слоя меди с сероводородом на поверхности образуется сульфид меди CuS. При температурах выше 200 °C взаимодействие меди с кислородом значительно увеличивается. Сначала образуется закись меди, далее - оксид меди. Оксид меди начинает образовываться на поверхности только после того, как закись меди достигнет определенной толщины – выше 25 микрон. Причина этого явления объясняется тем, что процесс окисления происходит за счет диффузионных процессов атомов меди через пленку оксида меди к кислороду атмосферы. Поскольку медь и ее оксид почти не отличаются по цвету, определить начальную стадию окисления визуально - сложно. Следующей особенностью оксида меди является его химическая стойкость. При температурах свыше 800 °C оксид меди разлагается на чистую медь и её закись [5].

Температура и скорость нагрева влияют на скорость роста окисной пленки. Например, при температурах 500 °С толщина оксидной пленки за секунду увеличится до двух микрон, через 60с. – пять микрон, через 90с. – семнадцать микрон. Зависимость просматривается логарифмическая. Поэтому для устранения окисления очищенной поверхности меди используют лужение оловянно-свинцовыми припоями или чистым оловом. Нанесенный слой не должен превышать толщину более десяти микрон. Предпочтительным вариантом здесь является лужение припоями на основе олова. Слой олова позволяет обеспечивать смачивание в течение долгого времени. Слой олово-свинец может привести к образованию слоев интерметаллида медь-олово. Поскольку олово будет образовывать интерметаллиды с медью, свинец будет образовываться на поверхности слоя и, в некоторых случаях, затруднять растекание припоев. На поверхности медных сплавов так же могут образовываться оксиды  $\text{CuO}$  и  $\text{Cu}_2\text{O}$ . При образовании оксидов других металлов ситуация может осложниться. При диссоциации оксидов металлов, таких как никель, марганец и свинец, проблем при низкотемпературной пайке можно избежать. Для пайки таких сплавов, применяют флюсы на основе канифоли, как и для пайки чистой меди [3].

Наиболее широкое применение для пайки меди и ее сплавов находит пламя газовой горелки или паяльник. Так же возможен печной нагрев или нагрев погружением в расплавленный припой. Применение низкотемпературных припоев характеризуется их простотой использования. При пайке с использованием паяльника недостатками являются небольшая область применения для изделий, сложность паять большие толщины и нагревать паяльник до температур выше трехсот градусов. Для нагрева больших изделий применяют газовые горелки с большой мощностью. Теплопроводность меди в 6 раз больше, чем у сплавов на основе железа. Пайка погружением в расплавы припоев и солей так же применяется для медных изделий, например, так паяют медные трубчатые теплообменники. Для пайки погружением в расплавы солей используют специальные печи-ванны. При этом соли являются как нагревающей средой, так и средой, которая устраняет с поверхности меди и ее сплавов

оксидную пленку. Данное явление достигается за счет реакции флюсующего воздействия. При погружении медных деталей в расплав припоя нужно обеспечить его защиту от окисления. Это достигается за счет введения инертных газов или активированного угля. К недостаткам этих технологических приемов относится удаление наплывов припоя или остатков солей после пайки.

«Пайка медью осуществляется в защитной атмосфере без флюса. Но когда в основном металле содержится 1—2% хрома, марганца, кремния, ванадия, алюминия или цинка, которые при нагреве легко образуют окислы, применение флюса (в совокупности с защитной атмосферой) для восстановления окислов желательно, а иногда даже необходимо» [20].

### **1.7 Описание и характеристики стали марки Ст 3**

«Конструкционную углеродистую сталь обыкновенного качества Ст3 применяют для изготовления несущих и ненесущих элементов для сварных и не сварных конструкций, а также деталей, работающих при положительных температурах. Листовой и фасонный прокат 5 категории (до 10мм) - для несущих элементов сварных конструкций, предназначенных для эксплуатации в диапазоне от —40 до +425 °С при переменных нагрузках. Сплав Ст3 содержит: углерода - 0,14-0,22%, кремния - 0,05-0,17%, марганца - 0,4-0,65%, никеля, меди, хрома - до 0,3% , мышьяка до 0,08%, серы и фосфора - до 0,05 и 0,04% соответственно» [25].

Сталь ст3 не расположена к флокеночувствительности и отпускной хрупкости. Сваривается без каких-либо ограничений. Качество конструкционной стали определяется коррозионной стойкостью, механическими свойствами и свариваемостью. По своим механическим характеристикам стали делят на группы: сталь обычной, повышенной и высокой прочности.

Основные свойства стали непосредственно зависят от химического элементов, входящих в состав сплава и технологических особенностей производства.

Таблица 1.1 – Механические свойства стали марки Ст 3

Марка	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
Ст 3	380-490	245	26

«Основой структуры стали является феррит. Он является малопрочным и пластичным, цементит напротив, хрупок и тверд, а перлит обладает промежуточными свойствами. Свойства феррита не позволяют применять его в строительных конструкциях в чистом виде. Для повышения прочности феррита сталь насыщают углеродом (стали обычной прочности, малоуглеродистые), легируют добавками хрома, никеля, кремния, марганца и других элементов (низколегированные стали с высоким коэффициентом прочности) и легируют с дополнительным термическим упрочнением (высокопрочные стали)» [26].

«К вредным примесям относятся фосфор и сера. Фосфор образует раствор с ферритом, таким образом снижает пластичность металла при высоких температурах и повышает хрупкость при низких. Образование сернистого железа при избытке серы приводит к красноломкости металла. В составе стали ст3 допускается не более 0,05% серы и 0,04 % фосфора» [26].

«При температурах, недостаточных для образования ферритной структуры возможно выделение углерода и его скопления между зернами и возле дефектов кристаллической решетки. Такие изменения в структуре стали понижают сопротивление хрупкому разрушению, повышают предел текучести и временного сопротивления. Это явление называют старением, в связи с длительностью процесса структурных изменений. Старение ускоряется при наличии колебаний температуры и механических воздействиях. Насыщенные газами и загрязненные стали подвержены старению в наибольшей степени» [26].

Конструкционные стали производят мартеновским и конвертерным способами. Качество и механические свойства сталей кислородно-конвертерного и мартеновского производства практически не отличаются, но кислородно-конвертерный способ проще и дешевле.

По степени раскисления различают спокойные, полуспокойные и кипящие стали. Кипящие стали - нераскисленные. При разливке в изложницы они кипят и насыщаются газами. Для повышения качества малоуглеродистых сталей используют раскислители - добавки кремния (0,12 - 0,3%) или алюминия (до 0,1 %). Раскислители связывают свободный кислород, а образующиеся при этом алюминаты и силикаты увеличивают количество очагов кристаллизации, способствуя образованию мелкозернистой структуры. Раскисленные стали называют спокойными, т.к. они не кипят при разливке. Спокойные стали более однородны, менее хрупкие, лучше свариваются и хорошо противостоят динамическим нагрузкам. Их применяют при изготовлении ответственных конструкций. Ограничивает применение спокойной стали высокая стоимость и по технико-экономическим соображениям наиболее распространенным конструкционным материалом является полуспокойная сталь. Для раскисления полуспокойной стали используется меньшее количество раскислителя, преимущественно кремния. По качеству и цене полуспокойные стали занимают промежуточное положение между кипящими и спокойными.

Из группы малоуглеродистых сталей обычной мощности (ГОСТ 380-71, с изм.) для строительных конструкций применяют сталь марок Ст3 и Ст3Гпс. Сталь ст3 производится спокойной, полуспокойной и кипящей.

В зависимости от эксплуатационных требований и вида конструкций, сталь должна отвечать требованиям ГОСТ 380-71. Углеродистая сталь подразделяется на 6 категорий. При поставке стали марок ВСт3Гпс и ВСт3 всех категорий требуется гарантированный химический состав, относительное удлинение, предел текучести, временное сопротивление, изгиб в холодном состоянии. Требования ударной вязкости различаются по категориям.

## **1.8 Описание и технологические свойства меди**

Медь относится к самым распространенным цветным металлам. Она обладает высокими антикоррозийными свойствами как при нормальных

атмосферных условиях, так в пресной и морской воде и других агрессивных средах. Однако медь не устойчива в аммиаке и сернистых газах.

Медь легко поддается обработке давлением и пайкой. Обладая невысокими литейными свойствами, медь тяжело режется и плохо сваривается. На практике медь используется в виде прутков, листов, проволоки, шин и труб.

Бескислородная М0 (0,001% O<sub>2</sub>) и раскисленная М1 (0,01% O<sub>2</sub>) медь широко применяется в электронике, электровакуумной технике, в электротехнической промышленности.

Сплавы, содержащие в своём составе медь, обладают высокими антикоррозийными свойствами, хорошо сопротивляются износу и имеют высокие технические и механические характеристики.

Медь бывает разных марок: М00, М0, М1, М2 и М3. Марки меди определяются чистотой её содержания.

В меди марок М1р, М2р и М3р содержится 0,01% кислорода и 0,04% фосфора. В составе меди марок М1, М2 и М3 процентное содержание кислорода составляет 0,05-0,08 %.

Марка М0б характеризуется полным отсутствием кислорода. Процентное содержание кислорода в марка М0 составляет до 0,02%.

Таблица 1.2 – Чистота содержания различных марок меди

Марка меди	М00	М0	М0б	М1	М1р	М2	М2р	М3	М3р
Процентное содержание меди	99,99	99,95	99,97	99,90	99,90	99,70	99,70	99,50	99,50

В зависимости от того, как примеси взаимодействуют с медью, они подразделяются на три группы:

- 1) Примеси, которые образуют с медью твёрдые растворы – никель, сурьма, алюминий, цинк, железо, олово и др. Эти примеси оказывают существенное влияние на электропроводность и теплопроводность меди,

снижая их. Ввиду этого в качестве проводников тока используют медь М0 и М1, в состав которых входит не более 0,002 As и 0,002 Sb. Горячая обработка давлением затрудняется, если в ней содержится сурьма.

- 2) Примеси, которые практически не растворяются в меди – висмут, свинец и др. Практически не влияют на электропроводность меди, но затрудняют её обработку давлением.
- 3) Хрупкие химические соединения, образующиеся в примеси меди с серой и кислородом. Кислород, входящий в состав меди, в значительной мере снижает её прочность и уменьшает электропроводимость. Сера способствует улучшению обрабатываемости меди резанием.

## 1.9 Описание припоев

### 1.9.1 Припой марки Л63

Припой Л63 является одним из наиболее востребованных и распространенных латунных припоев. Он может быть выполнен, как многокомпонентный или же, как двойной сплав с основой в виде меди. Легирующим компонентом в данном случае выступает цинк. Количество в припое меди указывается в маркировке и в данном случае составляет 63%. И это предопределяет главные его свойства. Температура плавления составляет 850-910 °С.

Таблица – 1.3 Химический состав припоя Л63 в %

Cu	Zn	Pb	Fe	P	Sb	Bi	Прочие примеси
62-65	34,5-38	До 0,07	До 0,2	0,001	0,005	0,002	0.5

Наиболее часто к использованию припоя этого типа прибегают в процессе пайки соединений, эксплуатация которых протекает в непростых и напряженных условиях. К примеру, когда к швам предъявляются повышенные требования по отношению к их высокой пластичности. Благоволит этому и тот факт, что припой,



изготовленный под маркой Л63, обладает высокими механическими свойствами и характеризуется высокой температурой. Ему характерен узкий интервал кристаллизации и большая растворимость цинка в меди. Все это позволяет максимально эффективно его использовать.

В ряде случаев, желательно прибегать при пайке к использованию окислительного пламени. Такой подход надежно уберегает образовавшееся соединение от охрупчивания и позволяет всегда добиваться максимально качественных и надежных результатов.

### 1.9.2 Припой марки ЛКБО 62-0,2-0,04-0,5

Наряду со стандартными медно-цинковыми припоями для пайки используется латунь марки ЛКБО 62-0,2-0,04-0,5, содержащая олово, кремний и бор. Проволока ЛКБО 62-0,2-0,04-0,5 подходит для пайки латунных, пайки бронзы, а также для наплавления слоя металла на поверхность отливок из углеродистой стали. Она отличается высокой стойкостью к коррозии, что обеспечивает защиту от окисления полученного сварочного шва.

Паяльные работы с использованием данного припоя могут производиться в обычной атмосфере с применением высокочастотного быстрого нагрева без использования флюса, а также в нейтральной атмосфере (в плавильных печах с аргоном и гелием). Помимо этого, допускается использование припоя в вакуумной среде и в атмосфере газообразного флюса.

Таблица – 1.4 Химический состав припоя ЛКБО 62-0,2-0,04-0,5 в %

Cu	Zn	Si	Sn	B
60,5-63,5	39-41	0,1-0,3	0,3-0,7	0,03-0,1

Упругость и прочность проволоки ЛКБО позволяют ей выдерживать нагрузку на излом без повреждений и деформаций. Также к ее достоинствам относятся высокая износостойкость и не подогревая дает возможность механической обработки. Эстетичный внешний вид позволяет применять данный

прокат для изготовления декоративных изделий. Температура плавления составляет 890-930 °С.

Для создания проволоки ЛКБО используется двухкомпонентная либо сложносоставной латунный сплав. Проволока ЛКБО формируется с помощью холодного волочения согласно ГОСТ 16130-90. Диаметр поперечного сечения колеблется от 0,1 до 8 мм. Выполняется изделие в мягком и твердом состоянии с нормальной или повышенной точностью выполнения.

Поставляется проволока ЛКБО в продажу в мотках и катушках. Такая фасовка позволяет без малейших затруднений совершать ее транспортировку. Ярлык с маркированием размещается непосредственно на продукции.

### 1.9.3 Припой марки П 81

Припой П 81 имеет характеристики, как и многие другие медные припои. Пусть они не так ярко выдержаны как в припое П 14 офлюсованном, так как здесь куда меньшее содержание этого металла, но все равно, в составе он является доминирующим. Благодаря этому, он хорошо взаимодействует с бронзой, латунью, медью, а также может работать с различными их сплавами и разнообразными марками сталей. В промышленности припой П81 используется тогда, когда нет возможности применять сварку. Хоть он и уступает по прочности соединения данному процессу, но все равно может предоставить достаточные параметры для соединения, тем более, что не оказывает негативного воздействия на структуру основного материала. Зачастую температура плавления припоя значительно ниже, чем температура плавления самого металла, с которым идет спаивание. Припой П 81 нередко заменяет более дорогостоящие серебряные припои, с содержанием драгоценного металла от 25 до 45%. В качестве аналога он может применяться даже при сложных работах.

Одним из основных направлений использования является ремонт труб из меди, бронзы и латуни, а также восстановление контактов в токоведущих проводах в различной технике. Материал может работать как при высокой, так и

при низкой температуре, так что может применяться для холодного и горячего водоснабжения.

Часто в нем возникает потребность в автомобильных мастерских, где нет возможности использовать сварку, так как детали оказываются слишком тонкими. Хотя сварка тонкого металла электродом и оказывается более надежной, она не всегда применима к машинам, так как может оказывать сильное влияние на основной металл. В коммунальном хозяйстве припой П 81 применяется для ремонта и монтажа труб водоснабжения. Это один из основных материалов при пайке кондиционеров, холодильников и прочей климатической и холодильной техники. Пайка нержавеющей стали твердыми припоями может быть проведена при помощи этого материала. Ремонт теплообменников, радиаторов, конденсаторов, змеевиков и прочих деталей, которые находятся в автомобилях, котлах и бытовой техники осуществляется с дополнительным применением флюса. Характерной особенностью этой марки является возможность создания качественного соединения чугунных деталей.

Припой П 81 в своей основе содержит медь, соотношение которой составляет 53%. Это дает возможность заметно повысить температуру плавления сплава. Следующим по объему элементом идет цинк, который занимает 34%. Фосфора здесь содержится 6,5%, никеля – также 6,5%. При изготовлении допускается незначительное отклонение процентного содержания, но не более 1% каждого элемента.

Таблица 1.5 – Химический состав припоя П 81 в %

Cu	Zn	P	Ni
52-54	32-34	5,5-7,5	5,5-7,5

Температура плавления лежит в пределах от 630 до 660 градусов. Практически все варианты этого припоя выпускаются в виде проволоки и отличаются только диаметром. Припой П 81 с флюсом ФК 235 после использования дает достаточно прочность на разрыв, которая составляет 170 МПа. Лучше всего соединение осуществляется с медью, так как она доминирует в

составе. Благодаря свойствам пластичности можно производить из припоя кольца и закладные элементы, что обладают сложной формой.

#### 1.9.4 Припой марки Алармет 211

Припой Алармет 211 представляет собой соединение, содержащее порядка 57% меди, 7,3% олова, 1,4% никеля и определенное количество цинка (остальное). Это предопределяет и свойства данного соединения, и обуславливает большую часть сфер, в которых его использование покажет максимально качественные и прочные результаты. Зачастую к применению Алармет 211 прибегают для соединения меди и медных сплавов, различных сталей, никелевых сплавов и самого никеля, а также самых различных сочетаний этих материалов.

Таблица 1.6 – Химический состав припоя Алармет 211 в %

Cu	Zn	Pb	Ni
56	36	7	1

Превосходно показывает себя припой этого типа при пайке калориферов, теплообменников, холодильного оборудования и холодильников, волноводов, бытовых смесителей, кондиционеров и разнообразных электрических машин, характеризующихся высокой мощностью.

Выпускают Алармет 211 в виде прутков, с диаметром в 1-2,4 мм, проволоки различного диаметра и ленты с толщиной не более 0,4 мм и шириной в 20 или 10 мм. Все это позволяет при решении каждой задачи получать наиболее выигрышные результаты. Особенно, если при пайке придерживаться температуры не более 890 и не менее 850 градусов, она является оптимальной. Плавиться же припой уже при 800-830 градусах Цельсия.

#### 1.9.5 Припой марки ПСр-45

Припой ПСр-45 является сплавом 45% серебра, 30% меди, 25% цинка. Температура солидус 665 °С, температура ликвидус 730 °С. Припой ПСр-45 применяется для лужения и пайки меди, медных и медно-никелевых сплавов,

никеля, кобальта, нейзильбера, латуни и бронзы, пайки и лужения ювелирных изделий.

Таблица 1.7 - Химический состав припоя ПСр-45 в %

Ag	Cd	Cu	Zn	Fe	Ni	Pb	Bi	Прочие примеси
39-41	23,49-28,55	16-17,4	16,2-17,8	До 0,1	0,1-0,5	До 0,05	До 0,005	0,15

Припой ПСР 45 относится к среднеплавким материалам, так что его можно применять и для пайки при высокой температуре. Это серебряный припой, который входит в группу сплавов, где имеется и наиболее близкий по составу припой ПСР 40. Эта марка получила широкое распространение во многих сферах, так как, несмотря на его относительно высокую стоимость, за счет содержания дорогостоящего серебра, дает очень высокое качество соединения, обладающее большой прочностью.

Другим бесспорным преимуществом припоя марки ПСР 45 является высокий уровень пластичности получаемого с его помощью соединения. Данному качеству материал также обязан присутствующему в его составе серебру. После того, как шов окончательно застыл, он становится практически не подверженным деформации. Но даже в том случае, если это происходит в результате значительного механического воздействия извне, место соединения не разрушается благодаря превосходной пластичности материала. Данная особенность позволяет применять припой этой марки в механизмах, которые характеризуются большой подвижностью и высокой вероятностью изгибов и других видов деформации на швах.

Важным моментом является устойчивость припоя к разрушительному влиянию агрессивных сред, благодаря чему он активно применяется в химической промышленности. Швы, полученные с его помощью, также отлично переносят воздействие высоких температур, однако все-таки эксплуатация в условиях

крайне экстремальных температур не рекомендуется во избежание возникновения внештатных ситуаций.

### 1.10 Описание флюса ФК-320

Флюс ФК-320 (рисунок 2) используется для создания паяных соединений устойчивых к коррозии и конструкционных сталей, меди и сплавов на ее основе с применением припоев с преобладающим количеством серебра в составе при температуре 700-900 градусов. Основным сырьем для изготовления являются фтористые соли, состав не применяется для работ с алюминием. Основной областью применения являются работы с припоями на основе меди и серебра, при этом спаиваемыми материалами выступают: серебро, медь, никель и сплавы на основе этих металлов.

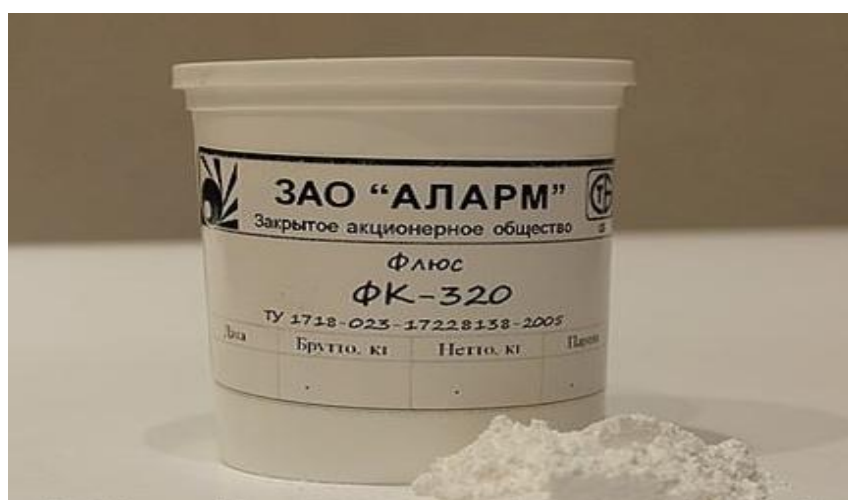


Рисунок 1.2 – Флюс порошковый ФК-320

Использование флюса ФК-320 позволяет исключить появление оксидных пленок при пайке, а также удалить ранее образованные на поверхности пленки. К преимуществам его стоит отнести и уменьшение поверхностного натяжения жидкой присадки, защиту металла в зоне пайки от внешних факторов.

Изготовление всех материалов осуществляется по нормативным документам, для флюса ФК-320 – ТУ 1718-23-17228138-2003. В нем содержится описание материала, а также основные характеристики.

Флюс паяльный ФК-320 высокотемпературный фторборатногалогенидный и боридногалогенидный. Он имеет белый цвет, характеризуется гигроскопичностью, пожарной и взрывной безопасностью. Активным состав становится при температуре 550-950 градусов. В качестве присадки может использоваться серебряный припой ПСР-45.

Таблица 1.8 – Химический состав флюса ФК-320 в %

В	F	К	О
11,5-13	30-33	23-25	30-32

### **1.11 Задачи магистерской диссертации**

Таким образом, для достижения цели диссертационной работы необходимо решить следующие задачи:

- 1) Разработать систему с контролируемой атмосферой, позволяющую создать газовую защиту изделий
- 2) Разработать методику проведения исследования индукционной пайки в контролируемой атмосфере
- 3) Оценить паяемость изделий из различных материалов в контролируемой атмосфере

## **2 Методика исследования**

### **2.1 Разработка методики проведения исследований индукционной пайки в контролируемой атмосфере**

«В распоряжении кафедры имеется высокочастотная установка индукционного нагрева СЭЛТ-001-15/44, разработанная компанией ООО «ИнтерСЭЛТ». Установка высокочастотного индукционного нагрева СЭЛТ-001-15/44 предназначена для различных технологических операций, таких как: плавка металлов, нагрев металлических изделий и деталей перед пластической деформацией, пайка твердосплавных пластин и т.д.» [1].

«При пайке изделий с использованием соответствующего индуктора размеры сечения заготовок составляют от 8×8 до 50×50 мм. Преобразователь частоты (рисунок 2.1) предназначен для преобразования трехфазного сетевого напряжения в переменное напряжение. Состоит из сетевого выпрямителя, фильтра, инвертора напряжения, высокочастотного трансформатора, компенсирующей батареи конденсаторов и блока контроллера управления. Органы коммутации расположены на боковой и задней панели блока и имеют следующие назначения» [1]:





Рисунок 2.1 – Преобразователь частоты

Таблица 2.1 – Техническая характеристика преобразователя частоты

Характеристика	Значение
Габариты и вес	
Габариты преобразователя частоты, ширина × высота × глубина, мм	300×550×520
Вес преобразователя частоты, кг	38
Электротехнические характеристики установки	
Максимальная потребляемая мощность, кВт	15
Максимальная колебательная мощность, кВт	14,2
Коэффициент полезного действия, %	95

Продолжение таблицы 2.1

Напряжение питающей сети, В/Гц	□ 380/50
Относительная нестабильность питающей сети, %	10
Максимальный потребляемый ток фазы, А	25
Чередование фаз питающей сети	любое
Частотный диапазон преобразователя, кГц	15-50

Автоматическая подстройка частоты на резонансный режим работы индуктора (максимальное согласование отдачи мощности)	есть
Возможная длина индуктирующего провода, м	0,6-3,5
Интерфейс с оператором	ЖКИ, клавиат, ЗУМ
Вход для подключения дистанционных контактов вкл-выкл	есть
Выходное напряжение преобразователя, В	33
Максимальный выходной ток преобразователя, А	600
Номинальная продолжительность включения, %	100
Время непрерывной работы, ч	16

Таблица 2.2 – Характеристика защитных систем

Характеристика	Значение
Защита от рассогласования индуктора по частоте резонанса	есть
Защита от потребления тока выше нормы на 10%	есть
Защита от короткого замыкания витков индуктора	есть
Защита от перегрева преобразователя	есть
Защита от понижения протока охлаждающей воды через индуктор	есть

«Так же имеются системы охлаждения преобразователя частоты (воздушная) и индуктора (водяная). Минимальный расход охлаждающей воды индуктора 3л/мин, давление 1,5 – 2 кг/см<sup>2</sup>, температура воды 10-35 °С. Охлаждающая система может быть проточной или замкнутого типа с объемом жидкости не менее 1000 литров, в зависимости от интенсивности работы и условий охлаждения емкости.» [1].

Нагрев происходит в специальном индукторе, который предназначен для разогрева паяемых изделий до 1100 °С (рисунок 2.2). Индуктор представляет

собой скрученную медную трубу марки М1 с 5 витками и диаметром трубы 15 мм. Крепится индуктор к установке через накидные гайки, их используют при небольших токах (600-1000А). Поскольку индуктор является многовитковым, он имеет электроизоляцию в виде намотанного асбестового шнура залитого жидким стеклом



Рисунок 2.2 – Индуктор для пайки

Таблица 2.3 – Характеристика индуктора для пайки

Характеристика	Значение
Габариты индуктора $\varnothing$ внутренний $\times$ $\varnothing$ внешний $\times$ высота, мм	45 $\times$ 75 $\times$ 35
Электроизоляция	Асбестовый шнур, жидкое стекло
Рабочая температура индуктора, $^{\circ}\text{C}$	1100

Температура нагрева отслеживается с помощью инфракрасного стационарного пирометра с интервалом температур 250-1600 $^{\circ}\text{C}$  (рисунок 2.3), который подключен с помощью соединительного кабеля к разъему в преобразователе частоты. Пирометр закреплен на штативе и направлен на нагреваемые изделия. Показатель температуры отслеживается на экране дисплея с периодом обработки данных, примерно 0.5 сек. Погрешность показаний составляет  $65 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

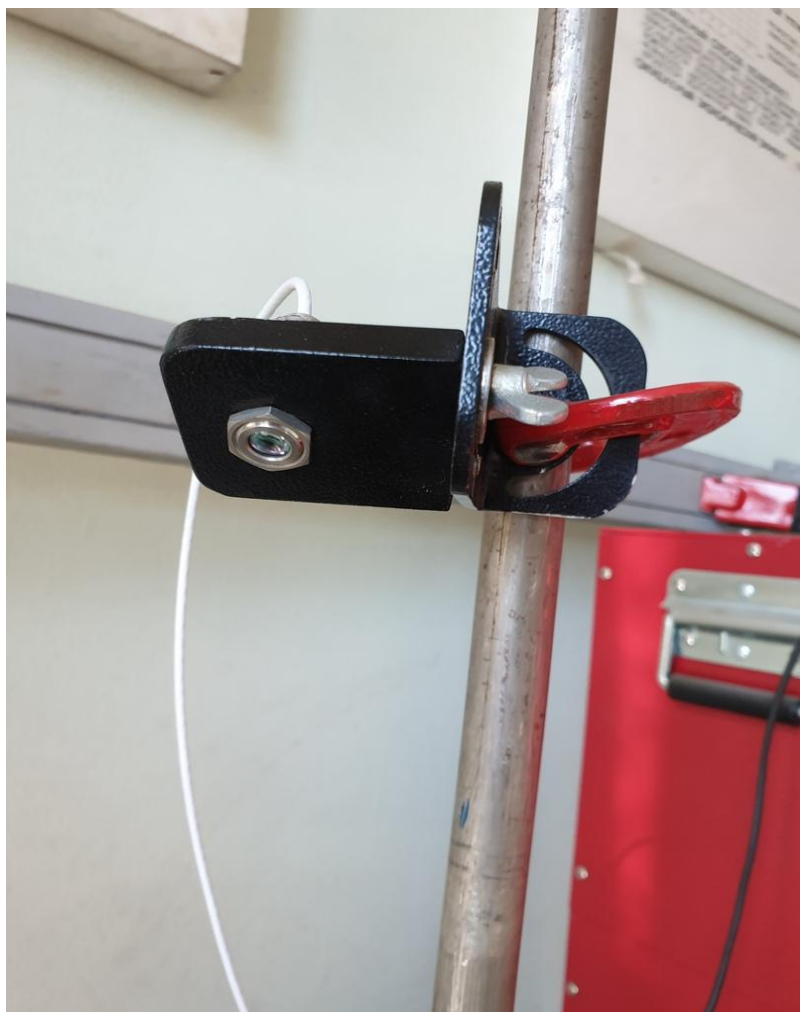


Рисунок 2.3 - Инфракрасный стационарный пирометра

## **2.2 Разработка системы с контролируемой атмосферой**

Индукционная установка предназначена для нагрева изделий на воздухе, но в процессе работ и исследований появляется необходимость использовать газовую защиту для различных технологических процессов. Поэтому была разработана специальная камера, которая заполняется аргоном.

Система газовой защиты представляет собой короб из склеенных плит (рисунок 2.4) из огнеупорного материала для высокотемпературной изоляции на основе алюмосиликатных волокон и неорганических связующих в виде модифицированных гидрозолей. Изделия из огнеупорных волокон сочетают в себе свойства огнеупоров и изоляции, обладают малой плотностью, просты в обработке.

«Высокотемпературные волокнистые изделия выпускаются по безобжиговой технологии в виде плит. Предельная температура применения: 1200°C - 1350°C.

Материалы и изделия выпускаются по ТУ 5767-001-6323104865-2007. Свойства этих материалов и изделий позволяют создавать принципиально новые легкие конструкции сводов перекрытий печей: плоских подвесных, арочных. При этом свод является одновременно перекрытием и теплоотражающим экраном (коэффициент черного тела материалов составляет 0,95-0,96). Особенно эффективно применение изоляции на основе огнеупорных волокон в термических печах периодического действия, так как они практически безинерционны (имеют низкую теплоемкость), не критичны к циклам «нагрев - охлаждение», обеспечивают выход на температурный режим при значительно меньших энергозатратах» [45].



Рисунок 2.4 – Короб из огнеупорного материала

Дополнительная обработка рабочей поверхности плит огнеупорным составом существенно повышает их эрозийную стойкость и позволяет использовать в рабочих пространствах печи при скоростях газового потока до 70 м/с.

Положительными свойствами огнеупорного волокна являются:

- Изделия обладают низкой плотностью и теплопроводностью, малой теплоемкостью, высокой термостойкостью и достаточной механической прочностью;
- Изделия изготовлены из материалов, не представляющих опасности для здоровья и не выделяющих при их монтаже и эксплуатации никаких вредных веществ;

- Изделия легко поддаются механической обработке (пиление, сверление, вырубка), могут обрабатываться и монтироваться с помощью любого ручного инструмента.

Общие габариты короба составляют 400x400x300 мм, стенки склеены между собой с помощью специального материала на основе клея, компоненты которого обладают высокой теплостойкостью. В задней стенке находится вырез под токоподводы индуктора. Так же в одной из стенок имеется отверстие, в которое вставляется штуцер со шлангом для подачи газа. На верхней крышке находится отверстие с кварцевым термостойким стеклом, которое, в процессе пайки, позволяет наблюдать за процессом.

В зависимости от конструкции паяемых изделий нагрев осуществляют или непосредственно от индуктора (прямой нагрев), или за счет теплоотдачи от графитового или стального вкладыша, нагреваемого ТВЧ (косвенный нагрев).

Для пайки малогабаритных изделий в условиях лаборатории было разработано приспособление, которое позволяет паять изделия с сечением менее 8x8 мм. При пайке таких изделий мощность установки автоматически снижается, что приводит к снижению температуры нагрева, которой становится недостаточно для завершения процесса. Приспособление представляет собой П-образную платформу с двумя опорами из углеродистой стали с размерами верхней части 110x30x10 (рисунок 2.5). С одной стороны основания расположен выступ высотой 1мм для удобства укладки пластин.

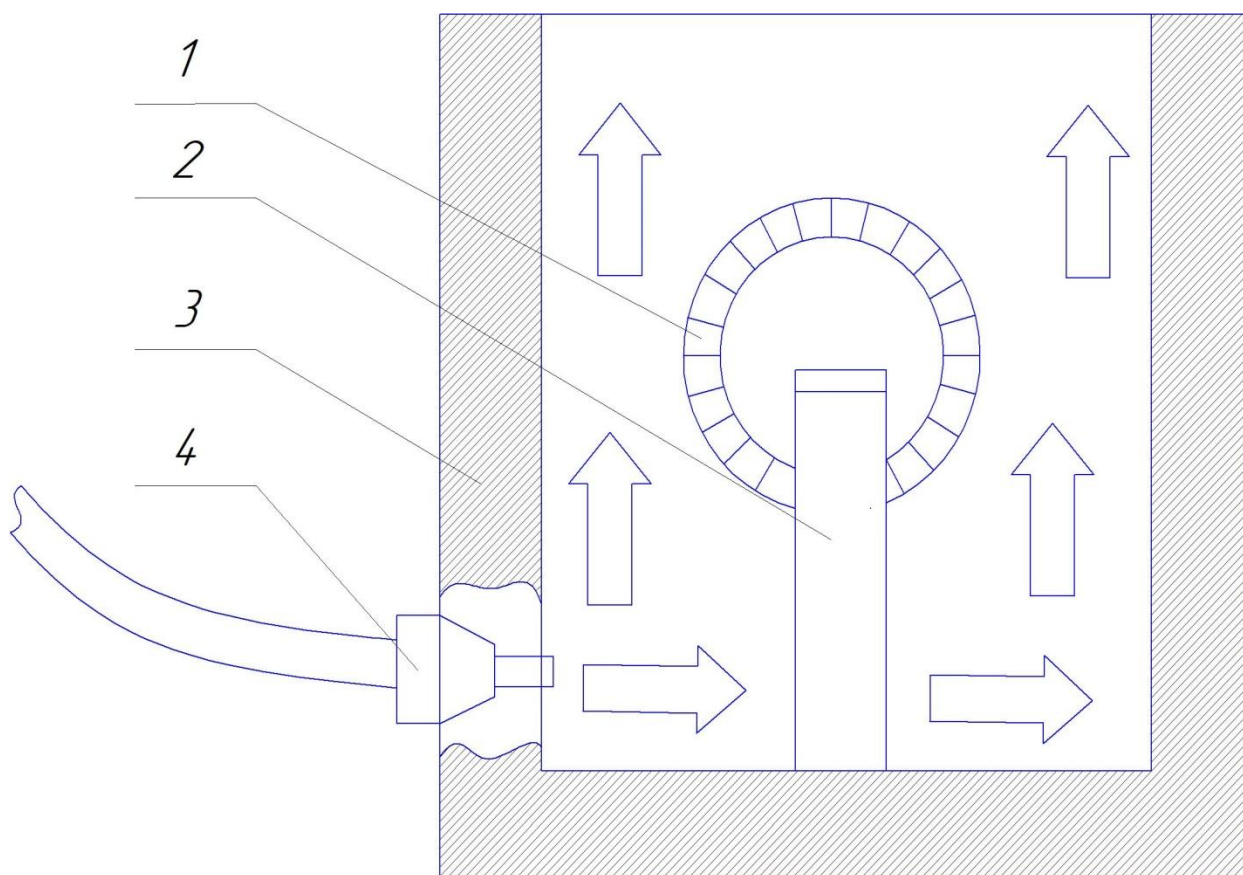




Рисунок 2.5- Приспособление для пайки пластин

Для создания защитной атмосферы при пайке изделий использовали инертный газ – аргон. Поставляется он в сжатом газообразном виде в баллонах серого цвета и изготовлен в соответствии с требованиями по ГОСТ 10157-79. Плотность аргона при давлении 760 мм рт. ст и температуре 273К (нормальные условия) составляет  $1,7839 \text{ кг/м}^3$ , что превышает плотность воздуха в 1,38 раз. Являясь более тяжелым, чем воздух, он заполняет среду камеры (рисунок 2.6), тем самым вытесняя воздух наружу и создавая благоприятную среду для пайки.





1 - индуктор для пайки; 2 - приспособление для пайки; 3 - короб из огнеупорного волокна; 4- шланг со штуцером для подачи аргона

Рисунок 2.6 – Схема заполнения камеры аргоном

### 2.3 Пайка пластин

Исследования процессов индукционной пайки в контролируемой атмосфере проводились при помощи специального индукционного оборудования и оснастки на пластинах из стали и меди размерами: длиной 60мм, шириной 15мм и толщиной 2 мм (рисунок 2.7). Для пайки пластин использовались припои Л-63, ЛКБО 62-0,2-0,04-0,5, П 81, ПСр-45, Алармет 211 и флюс ФК-320 растворенный в изопропиловом спирте.



Рисунок 2.7 – Образцы для пайки

Перед пайкой проводили зачистку образцов механическим способом с помощью УШМ для удаления загрязнений и толстой оксидной пленки. После механической обработки, проводилось обезжиривание поверхности изопропиловым спиртом для улучшения контакта припоя с поверхностью пластин.

Для начала следует поместить П-образное приспособление в индуктор и уложить на него пластины с припоем с величиной нахлестки 1мм.

Режимы для индукционной пайки задавались на блоке управления с последующим сохранением. Нагрев изделий производился в автоматическом режиме по мощности с задаваемым значением .

Перед началом работы с установкой необходимо включить подачу водного охлаждения с расходом не менее 3л/мин. В противном случае установка выдаст ошибку с сигнальным индикатором, и не будет работать.

После того, как пластины с приспособлением уложили в индуктор необходимо заполнить систему защитным газом для вытеснения воздуха из области пайки. Расход аргона 15-20 л/мин и временем подачи примерно 20 сек.

По истечению времени можно производить нагрев до необходимой температуры.

Не выключать подачу аргона до полной кристаллизации припоя, затем достать изделие из камеры и охладить на воздухе.

Так же были выполнены эксперименты с совместным использованием контролируемой атмосферы в среде аргона и флюсом ФК-320 разбавленным в абсолютированном изопропиловом спирте с массовой долей 99,97% в соотношении долей 1:10. Для этих опытов не проводилось предварительное обезжиривание, поскольку пластины окунались в спиртовой раствор флюса, а так же проводилась дополнительная операция по очистке изделий с помощью металлической щетки.



Рисунок 2.8 – Процесс пайки пластин в контролируемой атмосфере

## 2.4 Исследование растекания припоя

Влияние параметров режима на растекание и смачивание припоем стали и меди определяли согласно ГОСТ 23904-79. Пайка. Метод определения смачивания материалов припоями. Образцы изготавливались из листовой стали и меди толщиной 2 мм, пластины размером 40x40мм. Перед испытанием пластины обезжиривали и зачищали. Зачистку проводили наждачной бумагой до образования гладкой поверхности, поскольку различные неровности поверхности ухудшают процесс смачивания. Обезжиривание проводили изопропиловым спиртом для лучшего контакта припоя с поверхностью пластины. Для измерения краевого угла смачивания проводили касательную в точке пересечения контура капли с поверхностью образца, измеряли угол наклона касательной (рисунок 2.9). Для каждой проекции капли измеряли краевой угол с левой и правой стороны. Вычисление краевого угла смачивания для данной капли проводилось по закону Юнга:

$$\Theta_1 = \frac{\Theta_{\text{лев}} + \Theta_{\text{прав}}}{2}$$

где  $\theta_{\text{лев}}$  и  $\theta_{\text{прав}}$  – измеренные значения краевого угла смачивания с левой и правой сторон соответственно.

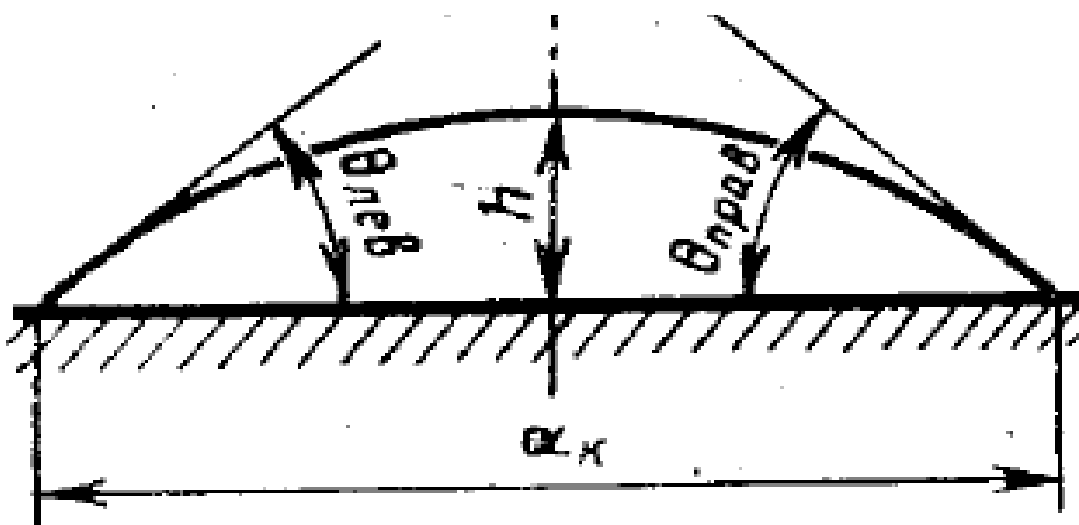


Рисунок 2.9 – Схема измерения краевого угла смачивания

Величина косинуса краевого угла определяет, смачивается ли твёрдая поверхность жидкостью или нет. Значения косинусов контактного угла приведена в таблице:

Таблица 2.4 – Описание краевого угла смачивая

Значение Cos <sup>0</sup>	Значение <sup>0</sup>	Описание
1	0	При данном значении косинуса, припой полностью растекается по поверхности твёрдого тела, такие поверхности называются сверхгидрофильными.
0.5	45	Припой на поверхности твёрдого тела образует менискообразные капли. Площадь контакта жидкости с поверхностью уменьшается. Такие поверхности называют гидрофильными
0	90	Припой приобретает полукруглую форму, площадь контакта с поверхностью ещё меньше.
-1	180	Припой на поверхности твёрдого тела образует сферические капли, однако, такое значение контактного угла в природе не наблюдается.

Краевой угол смачивания для каждого параметра эксперимента вычисляли по формуле:

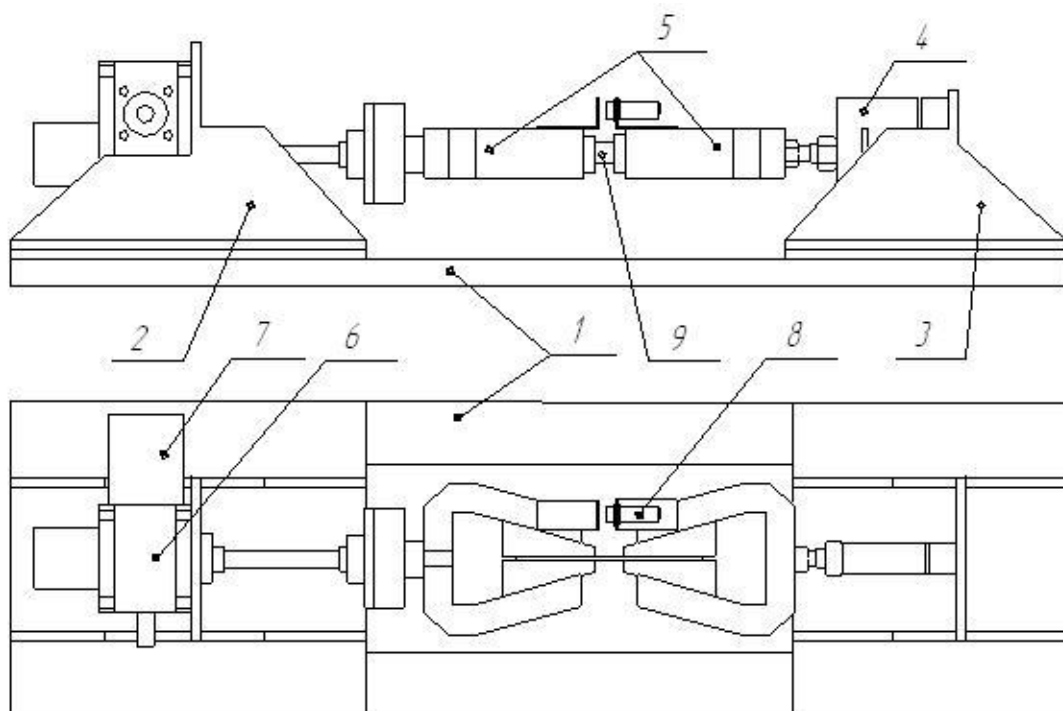
$$\Theta_{\text{ср}} = \frac{\Theta_1 + \Theta_2 + \dots + \Theta_n}{n}$$

где  $\theta_1 \theta_2, \dots \theta_n$  – значения краевого угла смачивания для каждой капли; n – число образцов.

## 2.5 Исследование прочности паяных соединений

Так же изделия испытывали на растяжение по ГОСТ 28830-90. Соединения паяные. Методы испытаний на растяжение и длительную прочность.

Схематичный вид стенда для измерения предела прочности паяных образцов представлен на рисунке 2.10.



- 1 - Основание; 2 - Опора винтового домкрата; 3 - Опора тензодатчика;  
4 - Тензорезисторный датчик силы БП-05; 5 -Клиновидные захваты МВ-1Т; 6 - Винтовой домкрат; 7 - Шаговый двигатель 85CSTH450C-012;  
8 - Датчик положения с аналоговым выходом ДПА-М18-86У-2110Н «СЕНСОР»; 9 - Образец для механических испытаний.

Рисунок 2.10 – Схематичный вид стенда

Для создания необходимой нагрузки на испытуемый образец служит винтовой домкрат фирмы «ZIMM» установленный на опоре. Опоры винтового домкрата и тензодатчика жестко закреплены на основании и имеют гальваническую развязку между собой и с основанием стенда. Через клиновидные зажимы, усилие, приложенное на шток винтового домкрата, фиксируется тензодатчиком. Управлением перемещением выдвижного штока домкрата производится с помощью шагового двигателя. Контроль изменения длины (деформации) образца, закрепленного в клиновидные захваты во время испытаний, регистрирует датчик положения с аналоговым выходом.

Управление шаговым приводом, контроль изменения длины образца и его температуры, а также регистрацией воздействующего усилия, возложено на программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК-150. Программа контроллера и визуализация процесса испытания разработана и написана в среде программирования CoDeSys.

Все данные отображаются в программе на компьютере, которая управляет и регистрирует весь процесс испытаний.

### 3 Результаты исследования

В ходе проведения экспериментов паялись образцы из стали и меди с различными припоями в контролируемой атмосфере на повышенных режимах с мощностью - 8кВт. Изделия с припоями ЛКБО и П81 в среде аргона спаялись достаточно хорошо (рисунок 3.1-3.4), что не скажешь об образцах с остальными припоями. Это связано с небольшим содержанием раскислителей, которые растворяют кислород в расплавленном металле.



Рисунок 3.1 – Образец из стали с припоем ЛКБО 62-0,2-0,04-0,5





Рисунок 3.2 – Образец из стали с припоем П81



Рисунок 3.3 – Образец из меди с припоем ЛКБО 62-0,2-0,04-0,5



Рисунок 3.4 – Образец из меди с припоем П81

Для получения соединений с припоями Л 63, Алармет 211 и ПСр-45 были изменены режимы. Время предварительной продувки рабочей камеры было увеличено до 60с., а так же увеличено время выдержки изделия в газовой среде после пайки. Однако изменение этих параметров не дало положительного результата.

В связи с этим применяли комбинированный способ с использованием контролируемой атмосферы и раствора флюса. Флюс ФК-320 смешивали с изопропиловым спиртом в соотношении 1:20 и окунали в него паяемые заготовки для улучшения защиты и смачивания поверхности. Результат оказался положительным и представлен на рисунках 3.5-3-11.



Рисунок 3.5 – Образец из стали с припоем ПСр-45



Рисунок 3.6 – Образец из меди с припоем ПСр-45



Рисунок 3.7 – Образец из стали с припоем Л-63



Рисунок 3.8 – Образец из меди с припоем Л 63



Рисунок 3.9 – Образец из стали с припоем Алармет 211



Рисунок 3.10 – Образец из меди с припоем Алармет 211

В результате проведения экспериментов было установлено, что при запуске процесса нагрева, мощность в 8кВт слишком велика для получения соединений с необходимой нахлесткой. Под воздействием магнитных сил, образцы сдвигались, а припой изредка вылетал из зоны соединения, и точная предварительная сборка теряла смысл. Поэтому был проведен ряд опытов на пониженной мощности. При пайке с мощностью 1-2 кВт температуры для расплавления припоя было недостаточно, из-за потери энергии на нагрев П-образного приспособления. Следовательно, мощность для проведения экспериментов задавалась равной 3кВт.

Такой режим является более щадящим по отношению к металлу и обеспечивает равномерный нагрев всего изделия, что положительно сказывается на его свойствах.

Образцы при таком режиме получились качественнее и представлены на рисунках 3.11



Рисунок 3.11 – Образец из стали с припоем Л63





Рисунок 3.12 – Образец из меди с припоем Л63



Рисунок 3.13 – Образец из стали с припоем Алармет 211



Рисунок 3.14 – Образец из меди с припоем Алармет 211



Рисунок 3.15 – Образец из стали с припоем ПСр-45





Рисунок 3.16 – Образец из меди с припоем ПСр-45

Так же были проведены опыты с алюминиевыми пластинами и припоем АЛ-2. Температура плавления алюминиевых пластин составляет  $660^{\circ}\text{C}$ , а припоя АЛ-2 в пределах  $620-640^{\circ}\text{C}$ . В процессе нагрева, температура повышается достаточно быстро за короткие сроки, поэтому возникают проблемы с определением режимов. В результате проведения экспериментов, припой плавится вместе с паяемыми образцами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения магистерской диссертации были определены возможности индукционной пайки различных металлов в среде аргона.

Была разработана специальная камера с контролируемой атмосферой для проведения процессов индукционной пайки в газовой среде.

Так же разработана методика проведения исследования индукционной пайки в контролируемой атмосфере на установке индукционного нагрева СЭЛТ-001-15/44 и сопутствующего к ней оборудования.

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить влияние мощности установки СЭЛТ-001-15/44 на качество получаемых образцов, а так же подобрать оптимальные значения для деталей с малым сечением.

В заключении, можно сделать вывод, что получение паяных соединений стали и меди с тугоплавкими припоями, при помощи индукционного нагрева в газовой среде аргона возможно, но исследования являются не окончательными и требуют дополнительного изучения. Еще не опробованы способы с применением других газовых сред и материалов, например, пайка в парах цинка с карбюризатором или в среде азота и его смесей. Эти способы могут увеличить качество паяемых деталей, а так же экономическую эффективность.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Журавель В.С. Модернизация установки индукционного нагрева СЭЛТ-001-15/44: бакалаврская работа: 15.03.01 / Журавель Валерий Сергеевич. – Тольятти, 2017. – 46 с.
2. Лашко, Н. Ф. Пайка металлов / Н.Ф. Лашко, С.В. Лашко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.
3. Сидоренко, В.Д. Применение индукционного нагрева в машиностроении / В.Д. Сидоренко. – Л.: Машиностроение, 1980. – 231 с.
4. Вологдин, В.В. Индукционная пайка / В.В. Вологдин, Э.В. Куш, В.В. Асамов; под общ. ред. А.Н. Шамова. – Л.: Машиностроение, 1989. – 72 с.
5. Колганов, Л. А. Сварочное производство: учебное пособие / Л. А. Колганов. - Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. - 512 с.
6. Краснопевцев, А.Ю. Бесфлюсовая пайка стальных изделий медноцинковыми припоями: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06 / Краснопевцев Александр Ювенальевич. – Тольятти, 1987. – 20 с.
7. Установка индукционного нагрева типа ИМ 60-8-50. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ambit.pro/uploaded/files/manual/ИМ\\_60\\_manual.pdf](http://ambit.pro/uploaded/files/manual/ИМ_60_manual.pdf)
8. Петрунин, И.Е. Справочник по пайке / И.Е. Петрунин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1984. – 400 с.
9. Петрунин, И.Е. Справочник по пайке / И.Е. Петрунин, Ю.И. Березников, Р.Р. Бунькина и др. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 480 с.
10. Лоцманов, С.Н. Справочник по пайке / С. Н. Лоцманов, И. Е. Петрунин, В. П. Фролов. – М.: Машиностроение, 1975. – 407 с.
11. ГОСТ 617-90. Трубы медные. Технические условия. – М.: Межгосударственный стандарт, 1992. – 15 с.

12. Богданов, В.Н. Применение сквозного индукционного нагрева в промышленности / В.Н. Богданов, С.Е. Рыскин – Москва, Ленинград: Машиностроение, 1965. – 96 с.
13. Сипягина, Л.Е. Способ пайки разнородных материалов: патент СССР 1593813 / Л. Е. Сипягина, В. Н. Семенов. – М., 1990. – 2 с.
14. Черноморский, М.М. Способ пайки труб: патент СССР 413002 / М. М. Черноморский, Ю. Д. Ершов, П. А. Ашихмин. – М., 1974. – 2 с.
15. Николаев, Г.А. Новые методы сварки металлов и пластмасс / Г.А. Николаев, Н.А. Ольшанский. – М.: Машиностроение, 1966. – 180 с.
16. Дубинин, Н.П. Технология металлов и других конструкционных материалов / Н. П. Дубинин, Н.Н. Лиференко, А.Д. Хренов и др.; под общ. ред. Н.П. Дубинина. – М.: Высшая школа, 1969. – 701 с.
17. Неровный, В.М. Физические основы источников энергии для сварки: учебное пособие / В.М. Неровный. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 134 с.
18. Каракозов, Э.С. Справочник молодого электросварщика / Э.С. Каракозов, Р.И. Мустафаев. – М.: Высшая школа, 1992. – 304 с.
19. Лашко, С.В. Производство паяных конструкций и стандартизация технологических процессов пайки: сборник статей / С.В. Лашко, И.Г. Нагапетян, Н.Ф. Лашко. – М.: ВНИИНМАШ, 1975. – 176 с.
20. Лысенко, А.Т. Руководство по пайке металлов: перевод с английского / А.Т. Лысенко; под общ. ред. С.Н. Лоцманова. – М.: Государственное научно-техническое издательство Оборонгиз, 1960. – 193 с.
21. Акимов, В.П. Способ пайки легкоплавкими припоями: Патент СССР 889319 / В.П. Акимов, С.В. Лашко, В.В. Мишнаевский. – М., 1981. – 2 с.
22. Щекин, В. А. Технологические основы сварки плавлением: учебное пособие / В.А. Щекин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2009. – 345 с.

23. Слухоцкий, А.Е. Установки индукционного нагрева: учебное пособие / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунэр. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
24. Шмыков, А.А. Контролируемые атмосферы: учебное пособие / А.А. Шмыков, Б.В. Малышев. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной и судостроительной литературы, 1953. – 364 с.
25. Леонидова, М.Н. Физико-химические основы взаимодействия металлов с контролируемыми атмосферами: учебное пособие / М.Н. Леонидова, Л.А. Шварцман, Л.А. Шульц. – М.: Металлургия, 1980. – 264 с.
26. Колосков, М.М. Марочник сталей и сплавов / М.М. Колосков, Е.Т. Долбенко, Ю.В. Каширский и др.; под общ. ред. А.С. Зубченко - М.: Машиностроение, 2001. – 672 с.
27. Краснопевцев, А. Ю. Пайка в контролируемых средах, классификация и развитие / А.Ю. Краснопевцев // Сварочное производство. – 2016. – №11. – С. 40–45.
28. Краснопевцев, А. Ю. Припои, образующиеся в процессе пайки / А.Ю. Краснопевцев // Сварочное производство. – 2010. – №12. – С. 15–18.
29. Пайка в контролируемых средах (контейнерная, в вакууме, газовых и жидких средах): Материалы семинара. – М.: ЦРДЗ, 2006. – 91 с.
30. Карабанов, В.В. Пайка в газовых средах / В.В. Карабанов, И.О. Бохоров // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2011. – №2. – С. 30–36.
31. Карабанов, В.В. Пайка в вакууме / В.В. Карабанов, И.О. Бохоров // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2011. – №4. – С. 31–39.
32. Краснопевцев, А.Ю. Высокотемпературная контейнерная пайка в автостроении / А.Ю. Краснопевцев // Автотракторное электрооборудование. – 2004. – №10. – С. 33–35.
33. Гузанов, Б.Н. Структура и прочностные свойства паяного соединения меди и нержавеющей стали с функциональным медным покрытием / Б.Н.

- Гузанов, Г.В. Минеев // Наноструктурированные материалы и функциональные покрытия. – 2016. – №3. – С. 67-73.
34. Парфенов, А.Н. Введение в теорию прочности паяных соединений / А.Н. Парфенов // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – №2. – С. 46-52 .
35. Лашко, С.В. Технология пайки изделий в машиностроении / С.В. Лашко, Е.И. Врублевский. – М.: Машиностроение, 1993. – 464 с.
36. Зенин, В.В. Оценка смачиваемости и растекания припоя по паяемой поверхности / В.В. Зенин, Ю.Е. Сегал, А.А. Колбенков // Петербургский журнал электроники. – 2000. – №2. – С. 32-36.
37. Алиеферов, А. Индукционный и электроконтактный нагрев металлов : монография / А. Алиеферов, С. Лупи. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 411 с.
38. Бабат, Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение / Г.И. Бабат. – Москва, Ленинград: Энергия, 1965. – 552 с.
39. Немков, В. Технологии индукционного нагрева / В. Немков // КРИТ Семинар. – 2003. – №12. – С.44.
40. Бодажков, В.А. Объемный индукционный нагрев / В.А. Бодажков; под общ. ред. А.Н. Шамова. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 1992. – 72 с.
41. Слухоцкий, А.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. – Л.: Энергия, 1974. – 267 с.
42. Лучкин, Р.С. Прочность и надежность паяных конструкций: учебное пособие / Р.С. Лучкин. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2014. – 161 с.
43. Гордиенко, А.И., Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева / А.И. Гордиенко, П.С. Гурченко, А.И. Михлюк, И.И. Вегера. – Минск: Беларуская навука, 2009. – 287 с.
44. Гордиенко, А.И. Индукционная термическая обработка в машиностроении: анализ, проблемы и перспективы развития / А.И. Гордиенко, А.И. Михлюк, И.И. Вегера. // Литье и металлургия. – 2010. – №2. – С. 140-148.

45. Трусова, И.А. Совершенствование технологий тепловой обработки металла на основе индукционного нагрева. Сообщение 1. Анализ перспективных направлений использования индукционного нагрева / И. А. Трусова, Д. В. Менделев, П. Э. Ратников // *Литье и металлургия*. – 2012. – №3. – С. 52-55.
46. Егоров, А.Г. Правила оформления выпускных квалификационных работ по программам подготовки бакалавра и специалиста [Текст] учеб. метод. пособие / А.Г. Егоров, В.Г. Виткалов, Г.Н. Уполовникова, И.А. Живоглядова – Тольятти, 2012, - 3 - 35с.
47. Самсонов, Г. Ф. Физико-химические свойства окислов : справочник / под ред. Г. В. Самсонова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Металлургия, 1978. - 471 с.
48. Кувалдин, А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали / А.Б. Кувалдин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.
49. Feldbauer, S.L. A Review of the Fundamentals of Stainless Steel Brazing in a Continuous Style, Controlled Atmosphere Brazing Furnaces / S.L. Feldbauer // *Brazing and Soldering 2006: Proceedings of the 3rd International Brazing and Soldering Conference IBSC*. – 2006. – P. 334-337.
50. Christopher, J. S. Handbook of Aluminium Recycling: fundamentals, mechanical preparation, metallurgical processing, plant design / J. S. Christopher // *Vulkan-Verlag Gmbh*. – 2006. – P. 111-116.
51. Miyazawa, Y. Brazing of Ti to stainless steel in under Ar-gas atmosphere / Y. Miyazawa et al. // *Brazing, High Temperature Brazing and Diffusion Welding: Lectures and Posters of the 8th International Conference taking place in Aachen*. – 2007. – P. 231-234.
52. Bach, Fr.-W. SCIB – Self-Cleaning Inert-Gas Brazing – a new process for brazing corrosion-resistant metals / Fr.-W. Bach et al. // *Brazing, High Temperature Brazing and Diffusion Welding: Lectures and Posters of the 8th International Conference taking place in Aachen*. – 2007. – P. 235-241.

53. Hartmann, T. Nickel-chromium-based amorphous brazing foils for continuous furnace brazing of stainless steel / T. Hartmann, D. Nützel // Brazing, High Temperature Brazing and Diffusion Bonding LÖT-2010: Lectures and Posters of the 9th International Conference taking place in Aachen. – 2010. – P. 42-47.