

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)»

---

На правах рукописи

МИСНИКОВ ВАЛЕРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ



Исследование и разработка процесса высокотемпературной пайки  
тангенциальных резцов горных машин припоями на основе порошков  
сплавов Cu-Mn-Ni

2.5.8. – Сварка, родственные процессы и технологии

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук

Пашков Игорь Николаевич

Москва, 2022

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ .....	11
1.1. Горные резцы.....	11
1.1.1. Технология изготовления горных резцов.....	13
1.1.2. Оборудование для изготовления резцов технологией пайки.....	23
1.2. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПАЯНЫХ ГОРНЫХ РЕЗЦОВ.....	27
1.2.1. Стали, используемые при изготовлении твердосплавного инструмента .....	28
1.2.2. Твердые сплавы.....	30
1.2.3. Флюсы .....	36
1.2.4. Припой, используемые для пайки горного инструмента.....	39
1.3. СПЛАВЫ СИСТЕМЫ CU-MN-NI .....	51
1.3.1. Анализ диаграммы состояния Cu-Mn-Ni с точки зрения разработки припоев .....	51
1.3.2. Применение сплавов системы Cu-Mn-Ni в промышленности .....	54
1.3.3. Формы применяемых припоев.....	55
ЗАКЛЮЧЕНИЕ К ГЛАВЕ 1 .....	57
ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	58
2.1. МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В РАБОТЕ .....	58
2.1.1. Паяемые материалы.....	58
2.1.2. Припой .....	59
2.1.3. Флюсы .....	62
2.2. МЕТОДИКА ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПАЯЛЬНЫХ СМЕСЕЙ.....	63
2.3. МЕТОДИКА АТОМНО-ЭМИССИОННОГО ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА.....	65
2.4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА.....	66
2.5. ИЗМЕРЕНИЕ КРАЕВЫХ УГЛОВ СМАЧИВАНИЯ .....	67
2.6. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	69
2.7. МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ .....	70
2.8. ПАЙКА ОБРАЗЦОВ .....	72
2.8.1. Индукционная пайка.....	72
2.8.2. Пайка в вакууме .....	73
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИПОЯМИ СИСТЕМЫ CU-MN-NI.....	77
3.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРНО ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ ПРИПОЕВ СИСТЕМЫ CU-MN-NI.....	77
3.1.1. Изучение физико-химических особенностей взаимодействия расплава припоя с поверхностью WC-Co.....	79

3.2. Влияние металлических покрытий нанесенных на твердый сплав на диффузионное взаимодействие с расплавом .....	84
Выводы к главе 3 .....	90
<b>ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЬ/ТВЕРДЫЙ СПЛАВ .....</b>	<b>92</b>
4.1. Выбор метода испытания.....	92
4.2. Влияние металлических покрытий на характер разрушения образцов .....	96
4.3. Влияние образования зоны диффузионного изменения в твердом сплаве на характер разрушения паяных образцов .....	98
4.4. Влияние состава припоя, а также температуры процесса пайки на предел прочности при испытаниях на срез .....	100
4.5. Влияние химического состава стали на предел прочности при испытаниях на срез .....	103
4.6. Влияние технологических параметров процесса получения соединений на предел прочности на срез .....	104
Выводы к главе 4 .....	107
<b>ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПАЙКИ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ РЕЗЦОВ ПОРОШКОВЫМИ ПРИПОЯМИ.....</b>	<b>108</b>
5.1. Типы соединений и конструкция образцов .....	108
5.2. Разработка составов паяльных смесей для индукционной пайки горных резцов.....	109
5.2.1. Влияние способа получения порошка припоя на качество паяных швов	109
5.2.2. Влияние схемы нагрева на образование пористости в тупиковых соединениях .....	113
Выводы по главе 5.....	126
<b>ГЛАВА 6 ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ ГОРНЫХ РЕЗЦОВ НА КОНВЕЙЕРНОЙ ЛИНИИ.....</b>	<b>127</b>
6.1. Юстировка параметров пайки на линии.....	129
6.2. Технологическая цепочка пайки резцов .....	130
<b>ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ .....</b>	<b>136</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>139</b>

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования**

В связи с разработкой более глубоких пластов при добыче полезных ископаемых и проходкой выработок в твердых породах, содержащих высокоабразивные включения, проблема создания высокопрочного горного инструмента является актуальной. Породоразрушающий инструмент, используемый в горных работах, состоит из двух основных частей, соединяемых высокотемпературной пайкой: стального корпуса и твердосплавной режущей части, обеспечивающей функциональные свойства инструмента. Корпуса инструмента изготавливаются из высоколегированных углеродистых сталей. Преждевременный износ или полное разрушение инструмента приводит к значительным экономическим потерям ввиду использования дорогостоящего твердосплавного материала, а также потере времени при простое, связанном с заменой инструмента на буровых машинах. Поэтому, в общемировой практике существует явная тенденция к увеличению эксплуатационного ресурса инструмента за счет роста предела прочности и ударной вязкости паяных соединений сталь/ WC-Co, а также износостойкости стальных корпусов.

Работоспособность инструмента, испытывающего ударно-абразивное воздействие, определяется величиной возможного прохода его в породе, или продолжительностью работы до замены. Ресурс инструмента зависит как от его конструкции, качества твердого сплава WC-Co, так и от механических характеристик паяного соединения сталь/ WC-Co.

В качестве присадочного материала используются сплавы систем Cu-Zn, Ag-Cu-Zn и Cu-Mn-Ni(Co). Паяные соединения, полученные при помощи серебряных припоев, обладают наилучшими механическими свойствами. Однако температура ликвидус  $T_{liq}$  большинства этих сплавов ниже 800 °С. Температура закалки сталей, используемых при изготовлении корпусов превышает 820 °С. Эти факторы накладывают определённые требования к припою и совмещенному технологическому процессу пайки и закалки, делая

применение сплавов Cu-Ag-затруднительным, из-за невозможности проведения термообработки продукции. Припой системы Cu-Zn широко применяются при пайке горного инструмента. Однако, механические свойства сплавов в этой системе гораздо ниже, чем у припоев Cu-Mn-Ni(Co).

На территории Российской Федерации отсутствует масштабное производство сплавов Cu-Mn-Ni(Co) в виде проката, по причине высокой трудоемкости и себестоимости процесса с одной стороны и, низкого размера рынка потребления с другой. Особенностью отечественного производства является изготовление широкой номенклатуры горных резцов небольшими партиями. Большое количество типоразмеров резцов приводит к такому же большому количеству типоразмеров закладных элементов припоя. Порошковые смеси удобно дозируются с высокой точностью, что решает проблему широкой номенклатуры изделий. Однако при применении порошковых систем для пайки тупиковых соединений необходимо учитывать особенности плавления и заполнения зазоров этими припоями.

Основной целью большинства работ на тему твердосплавного инструмента посвящены либо улучшению механических и абразивных свойств самих твердых сплавов, либо изучению механических свойств паяных соединений сталь\твердый сплав, паяных компактными припоями Ag-Cu и Cu-Zn. При этом, при изучении процесса пайки твердых сплавов со сталями акцент делается именно на взаимодействие расплава припоя с последней, а область контакта припой\твердый сплав рассмотрена не достаточно. В литературных источниках практически отсутствуют сведения о влиянии состава припоев системы Cu-Mn-Ni и температурно-временных режимов пайки на механические свойства соединений сталь/ твердый сплав.

В связи со всем вышеизложенным, наибольшего внимания в качестве перспективной и наименее изученной системы сплавов-припоев заслуживает система Cu-Mn-Ni(Co).

Интерес представляет применение данных сплавов в порошковой форме для соединения твердосплавных вставок со стальными корпусами

горного инструмента, а также установление зависимостей микроструктуры и механических свойств паяных соединений сталь\ WC-Co от элементного состава сплава-припоя Cu-Mn-Ni(Co) и фазового состава стали. Данные исследования дадут представления о процессах, протекающих при формировании паяных соединений сталь\ WC-Co и позволят разработать технологию пайки тангенциальных резцов при помощи порошковых припоев системы Cu-Mn-Ni(Co).

### **Цель работы.**

Создание научно-обоснованного технологического процесса соединения твердых сплавов со сталями при пайке тангенциальных резцов горнодобывающей техники на автоматических линиях при помощи порошковых паяльных смесей на основе сплавов системы Cu-Mn-Ni(Co).

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ составов и видов припоев, применяемых для пайки резцов горной техники;
2. Изучение влияния химического состава припоев на структурно-фазовое состояние паяных соединений;
3. исследование влияния нанесения металлических покрытий на формирование структурно-фазового состояния паяных швов сталь/твердый сплав;
4. Изучение влияния температурно-временных параметров процесса пайки на структурно-фазовое состояние соединений;
5. Разработка методики определения механической прочности паяных соединений сталь/твердый сплав
6. Изучение зависимости механической прочности паяных соединений на срез от химического состава припоя и температурно-временных параметров процесса пайки.

7. Изучение динамики плавления и заполнения зазоров при использовании порошковых паяльных смесей.
8. разработка технологии пайки тангенциальных крупногабаритных резцов на автоматической конвейерной линии при помощи порошковых паяльных смесей.

### **Научная новизна**

Установлены закономерности формирования микроструктуры соединений сталь-твердый сплав, выполненных припоями Cu-(14-25)Mn-(3-10)Ni-(0-5)Co. Определено, что структура состоит из двух фаз: твердого раствора  $\gamma$  - Cu(Ni,Mn,Fe,Co) и твердого раствора  $\alpha$  - Fe-Co. Выявлено, что количество  $\alpha$ -фазы зависит от температурно-временных параметров процесса пайки, а ее состав не зависит от этих параметров и определяется содержанием кобальта в припое. При легировании медно-марганцевой основы кобальтом происходит рост его содержания в  $\alpha$ -твердом растворе с 20 мас.% для припоев, легированных никелем, до 46 мас.%. Впервые доказано, что ее равномерное распределение по объему паяного шва увеличивает механические свойства соединения

Впервые установлено существование зоны с уменьшенной (в 2-5 раз относительно исходного материала) концентрацией Co в твердом сплаве на границе с припоем. Выявлено, что протяженность этой зоны зависит от температурно-временных параметров процесса пайки. Наибольшее влияние на протяженность зоны с уменьшенной концентрацией вносит температура пайки: при температуре превышающей температуру ликвидус припоя на 130 °C происходит двукратное увеличение размера этой зоны.

Разработана методика испытаний разнородных паяных соединений на срез, обеспечивающая схему нагружения, характерную для резцов в процессе эксплуатации. Применение данной методики позволило впервые получить для соединений 30ХГСА/Cu-(14-25)Mn-(3-10)Ni-(0-5)Co/BK8 точные значения и зависимости пределов прочности на срез паяных соединений от

температурно-временных параметров процесса пайки. Установлено, что разрушение происходит при нагрузках превышающих 400 МПа.

### **Практическая значимость**

Разработанная паяльная смесь, состоящая из распыленного газовым методом порошка припоя МНМц9-23,5 и 8 мас.% флюса, содержащего фторборат калия в качестве активной добавки, предназначена для пайки корпусов тангенциальных резцов из стали 30ХГСА с вставками из твердого сплава ВК8.

Разработанные технологии получения паяльных смесей на основе распыленных газовым методом порошков сплавов Cu-(14-25)Mn-(3-10)Ni-(0-5)Co и их составы применяются в ООО «Аларм». Для контроля качества паяльных смесей по применяемой технологии разработаны и внедрены методика определения количества флюса в паяльной смеси М 01-2022, а также методика определения растекания паяльной смеси М 02-2022.

Паяльная смесь ПС МНМц9-23,5, а также технологические приемы пайки, включающие в себя способ объемного дозирования припоя, сборки резцов, и температурно-временные режимы пайки прошли апробацию на предприятии АО «КЗТС» (Кировградский завод твердых сплавов).

Исследования, направленные на получение зависимостей и корреляции механических свойств и структурно-фазового состояния паяных соединений сталь/твердый сплав выполнялись в соответствии с грантом Российского фонда фундаментальных исследований №20-32-90011.

### **Методология и методы исследований**

Для решения поставленных в работе задач использованы следующие методы:

- Дифференциальный термический анализ – для установления температурных интервалов плавления исследуемых сплавов.
- Атомно-эмиссионный химический анализ – для установления химических составов исследуемых сплавов.



- Растровая электронная микроскопия с применением микрорентгеноспектрального анализа – для исследования структурно-фазового состояния паяных соединений, полученных при различных технологических условиях
- Оптическая микроскопия – для исследования процессов заполнения паяных соединений порошковыми смесями и исследования процессов формирования пористости.
- Метод магнетронного напыления покрытий – для определения влияния диффузионного взаимодействия расплава присадочного металла с твердым сплавом на границе расплав\твердый сплав.
- Метод лежащей капли – для исследования процессов смачивания и растекания припоев по подложкам.
- Метод механических испытаний на срез – для исследования механических свойств паяных соединений.

### **Положения и результаты, выносимые на защиту**

Закономерность влияния элементного состава применяемых припоев, материалов покрытия подложек и температурно-временных параметров процесса пайки на формирование структурно-фазового состояния соединений сталь/твердый сплав;

Методика испытания соединений сталь/твердый сплав на срез обеспечивающая схему нагружения, характерную для резцов в процессе эксплуатации;

Состав паяльных смесей на основе порошков сплавов системы Cu-Mn-Ni(Co) для пайки тангенциальных резцов горной техники, обеспечивающий высокие механические свойства.

Закономерность влияния состава паяльной смеси, технологии получения порошка и способа нагрева на формирование закрытой пористости в паяных швах тангенциальных резцов.

Научно обоснованный технологический процесс пайки тангенциальных резцов горной техники порошковыми припоями на основе сплавов Cu-(14-25)Mn-(3-10)Ni-(0-5)Co;

### **Соответствие паспорту специальности**

Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.5.8 «Сварка, родственные процессы и технологии»: физические процессы в материалах при сварке и родственных технологиях, фазовые и структурные превращения, образование соединений и формирование их свойств; тепловые процессы и деформации при сварке, пайке и наплавке.

### **Апробация работы**

Основные результаты, полученные в ходе подготовки диссертации, положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

XV-я Международная научно-техническая конференция "Быстрозакаленные материалы и покрытия" (Москва, 2018); Международная конференция «12th International Conference on Brazing, High Temperature Brazing and Diffusion Bonding» (Аахен, Германия, 2019); 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019»(Москва, 2019);XVII-я Международная научно-техническая конференция "Быстрозакаленные материалы и покрытия" (Москва, 2020); X Международная научно-практическая конференция «Прогрессивные литейные технологии» (Москва, 2020).

### **Публикации.**

Результаты исследований по теме диссертации изложены в 8 опубликованных работах, 3 из них в журналах, входящих в первый и второй перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

## **Структура и объём диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, выводов и списка использованных литературных источников. Работа представлена на 147 страницах машинописного текста, содержит 32 таблицы и 66 рисунков. Библиографический список включает 101 наименование.

### **Глава 1 Аналитический обзор литературы**

В первой главе диссертационной работы произведен анализ современного состояния технологий изготовления горного инструмента в РФ и за рубежом. В частности:

- проведен анализ конструкций горных резцов и методов соединения твердосплавных вставок с корпусами;
- рассмотрены современные материалы, применяемые при изготовлении горного инструмента, включая материалы для пайки (припой и флюсы), а также корпусные стали и твердые сплавы, используемые в качестве режущих вставок.

#### **1.1. Горные резцы**

Тенденциями развития в современной горнодобывающей отрасли являются увеличение надежности и производительности машин и агрегатов, используемых при добыче полезных ископаемых. Все это невозможно без разработки и применения нового, более энергоэффективного горного инструмента. Современный горный инструмент должен отвечать высоким требованиям, которые зачастую противоречат друг другу. С одной стороны это: высокая надежность (прочность и износостойкость), энергоэффективность (разрушение горной породы при минимальных затратах энергии), технологичность в изготовлении и эксплуатации. С другой же стороны от инструмента требуется быть недорогим, с низкой материалоемкостью.

В связи с этим ускорение прогресса в создании нового горного инструмента возможно только на основе системного подхода: увеличения прочности, износостойкости, ресурса инструмента, а также выбора его геометрических параметров и материалов для изготовления.

К горному инструменту относится инструмент, применяемый при разрушении пород горнодобывающими комбайнами: врубовые машины, комбайны, струги, перфораторы, буровые станки, отбойные молотки, горные сверла, экскаваторы и машины для вспомогательных горных работ[1].

Горный инструмент работает в тяжелых условиях: знакопеременные нагрузки, абразивный износ, изменение свойств разрушаемых пород, высокие температуры и.т.п. Повышение производительности и мощности горнодобывающих комбайнов приводит к увеличению нагрузки на инструмент, и, как следствие, его износу. Наблюдение за состоянием инструмента в процессе работы затруднено. В связи с этим к резцам для добычи полезных ископаемых предъявляют следующие требования:

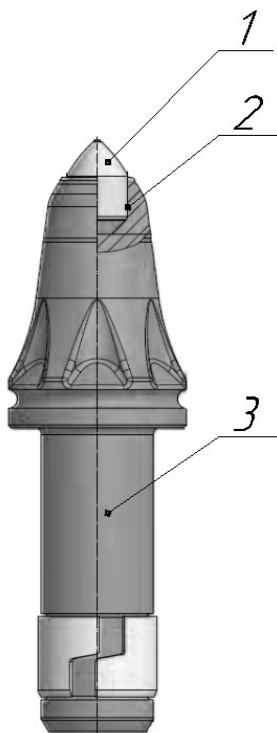
- энергоэффективность (разрушение горной породы с меньшей затратой энергии);
- прочность;
- износостойкость;
- простота и надежность закрепления державок в комбайне;
- невысокая стоимость изготовления и эксплуатации.

Согласно [2] резец - рабочий инструмент очистных и проходческих комбайнов, состоящий из державки и закрепленной в ней (на ней) армирующей вставки или пластины (твердосплавных изделий). Резцы для проходческих машин можно разделить на группы:

1. Тангенциальные – резцы, державки которых установлены под углом к поверхности резания:
  - поворотные – в процессе работы подвижны относительно продольной оси державки;

- неповоротные - в процессе работы подвижны относительно продольной оси державки.
2. Радиальные – резцы, державки которых установлены под углом 90 к плоскости резания.

Типовая конструкция тангенциального поворотного резца представлена на рисунке 1.1.



1 – твердосплавная вставка; 2 – паяный шов; 3 – стальная державка(корпус)

Рисунок 1.1 – Схема тангенциального поворотного резца [3]

В данной работе акцент делается на исследование процессов пайки тангенциальных поворотных и неповоротных резцов, как основного инструмента, используемого при добыче полезных ископаемых, в частности каменного угля.

### 1.1.1. Технология изготовления горных резцов

Технологию изготовления горного инструмента можно разделить на 3 составляющие, независимые друг от друга и в сумме и заключающие в себе производство горных резцов:

- изготовление твердосплавных вставок;

- изготовление державок;
- соединение державок с твердосплавными вставками.

Изготовление твердосплавных вставок довольно подробно описано в литературных источниках. Промышленным способом изготовления твердого сплава является жидкофазное спекание смесей из порошка карбида вольфрама WC и металлической связки (Ni, Co) в вакууме или водороде при температуре выше плавления связки [4].

В условиях крупносерийного производства корпуса резцов изготавливаются методом поперечно-клиновой прокатки, холодной высадки, а также ротационнойковки [5], которые обеспечивают наибольшую производительность. Для каждого из перечисленных методов используются стали с подходящими для процесса механическими свойствами (пластичностью, ковкостью). Получаемая микроструктура стали также зависит от применения того или иного метода металлообработки.

В условиях мелко- и среднесерийного производства зачастую используется обработка металла резанием: токарные и фрезерные работы с применением станков с числовым программным управлением (ЧПУ).

Наибольшую вариативность параметров процесса имеет технология соединения стального корпуса и твердосплавной вставки. Сложность при соединении твердого сплава со сталью представляет разность в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКЛР) обоих материалов. В то время как сталь имеет ТКЛР в пределах от  $10 \text{ C}^{-1}$  до  $16 \text{ C}^{-1}$ , наиболее применимый при изготовлении вставок твердый сплав BK10 обладает коэффициентом линейного расширения  $5,1 \text{ C}^{-1}$  [6]. Все это приводит к сложностям, возникающим при проектировании инструмента: при нагреве заготовки зазор будет увеличиваться, а при охлаждении из-за разницы ТКЛР будет возникать дополнительное напряженное состояние, при всестороннем обжатии сталью твердого сплава. Ввиду всего вышесказанного, особое внимание при разработке и применении технологии соединения твердого сплава со сталью, является метод нагрева.

Способ соединения твердосплавной вставки и стального корпуса должен обеспечивать надежность и прочность соединения в течение всего срока эксплуатации изделия. Применяются следующие методы соединений: диффузионная сварка в вакууме [7], сварка плавлением [8,9], высокотемпературная пайка [9–13], пайка с исчезающей жидкой фазой, а также могут использоваться такие методы как механическое соединение [14].

### **Диффузионная сварка**

Диффузионная сварка в вакууме – это разновидность сварки давлением, которая осуществляется благодаря взаимной диффузии атомов контактирующих частей при относительно длительном воздействии повышенной температуры и незначительной пластической деформации. Сварка производится в вакууме или в восстановительной газовой атмосфере для предотвращения окисления деталей. Соединяемые поверхности нагреваются до температуры, равной 0,5 – 0,7 температуры плавления металла, имеющего более низкую температуру плавления, сжимают и выдерживают в сжатом состоянии некоторое время. Из-за различия физико-механических свойств (теплопроводность, коэффициент термического линейного расширения, предел прочности при сжатии) сварку твердых сплавов со сталью проводят с применением промежуточной прослойки, в роли которой часто выступает никель [15].

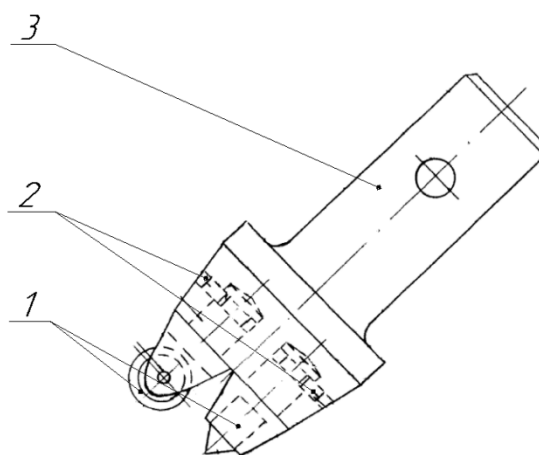
На прочность сварного соединения сильное влияние оказывают технологические режимы сварки. Больше всего прочность соединения зависит от изменения температуры сварки. Предел прочности соединений твердый сплав ВК20-сталь, выполненных на оптимальных режимах, составляет: на срез: – 400 – 460 МПа; на кручение: 280 – 300 МПа; на растяжение: 600 – 880 МПа [16].

Диффузионная сварка может обеспечить требуемую надежность изделию и является одним из лучших способов соединения твердого сплава со сталью. Метод широко используется для соединения твердого сплава со сталью при изготовлении пуансонов ударного выдавливания и объемного

деформирования, вырубных штампов и пресс-форм для порошковой металлургии и обеспечивает высокую работоспособность изготовленных деталей. Однако, при диффузионной сварке твердого сплава и стали неизбежно возникновение напряжений первого рода, которые вызывают деформацию детали и служат причиной ее разрушения либо после сварки, либо в процессе работы, поэтому при разработке технологии сварки твердого сплава со сталью необходимо стремиться уменьшить уровень напряжений настолько, чтобы они не влияли отрицательно на работоспособность детали. Производительность такого метода довольно низкая и составляет до 10 изделий в час. В условиях реального производства производительность составляет порядка 150 изделий в час. В связи с этим, диффузионная сварка, при всех своих плюсах в механических свойствах, не может обеспечить массовость производства.

### Механическое соединение

Известны случаи использования сменных твердосплавных рабочих частей в резцах проходческих машин [17–19]. В данных изобретениях в стальной корпус закрепляется два режущих элемента из твердого сплава. Схематичное изображение такого резца приведено на рисунке 1.1.



1 – сменная рабочая часть(WC); 2 – резьбовые отверстия для крепления сменных рабочих частей; 3 – стальная державка

Рисунок 1.1 – Горный резец со сменными рабочими частями [14,20]



Преимуществом такого резца является его режим резания, при котором твердосплавный диск предварительно разбивает породу, а затем последняя срезается конической вставкой. По заявлениям авторов изобретения последовательное разрушение массива сначала твердосплавным диском, а затем конусным наконечником позволяет снизить энергозатраты комбайна, уменьшить образование пыли в забое и появление фрикционных искр, снизить риск взрыва пыле-метано-воздушной атмосферы. Совместная последовательная работа режущей и скалывающей сменных частей головки в одном инструменте обеспечивает эффективное разрушение углеродного массива резцом.

Однако с критической точки зрения данное изобретение довольно металлоемко, ввиду того, что по длине резца, твердосплавные элементы занимают почти 1/3 и имеют сложную для изготовления форму, в то время как общемировой тенденцией является снижение металлоемкости и, как следствие, стоимости инструмента. Вдобавок к этому, в ходе горных работ абразивному воздействию подвергается не только элементы резцов, состоящие из твердого сплава, но и стальные державки. Твердость твердосплавных элементов находится в пределах от 86 до 92 HRA, в зависимости от марки применяемого сплава. Твердость же стальных державок, согласно [2] находится в пределах 36-55HRC. Такая весомая разница в значениях не дает сделать однозначного вывода о том, износ какой части будет происходить быстрее: рабочей твердосплавной при прямом контакте с разрушаемой породой или же косвенного износа державки раздробленной породой.

### **Сварка плавлением**

Сварку плавлением также применяют как при соединении твердых сплавов со сталями в целом, так и при изготовлении горного инструмента в частности. В работе [12] авторы используют лазерную сварку для соединения твердого сплава ВК8 со сталью 40Х. Лазерная сварка, по словам авторов, позволяет соединять твердые сплавы со сталями за счет высокой точности и

низкого теплового эффекта, минимизирующие изменения микроструктуры и остаточные напряжения в сварных швах. При использовании лазерного нагрева происходит разложение карбида вольфрама WC в околошовной зоне, углерод из которого переходит в сварочную ванну. Это явление вызывает охрупчивание сварного шва за счет образования интерметаллидов. Однако, в статье [21], авторы предложили использовать предварительный разогрев подложек до 400 С для уменьшения остаточных напряжений, что позволило увеличить прочность соединений. Прочность таких соединений на срез варьируется от 100 МПа до 200 МПа в зависимости от режимов сварки[12].

В литературных источниках также имеются сведения о применении аргонодуговой (TIG) и дуговой (MMA) сварки при соединении твердых сплавов со сталями. Этот метод позволяет либо наплавлять твердый сплав на сталь, упрочняя ее поверхностно, либо осуществлять ремонт твердосплавных изделий при помощи специальных электродов [22].

Данная технология также не обеспечивает высокую производительность, но в отличие от диффузионной сварки сварные соединения сталь-твердый сплав, полученные методами TIG, MMA и лазерной сварки имеют низкую прочность, а остаточные напряжения после сварки велики.

### **Высокотемпературная пайка**

Наиболее используемым в промышленности процессом соединения твердых сплавов со сталями, в частности для соединения твердосплавных вставок со стальными державками резцов горнопроходческой техники, является высокотемпературная пайка [23]. Пайка обладает рядом преимуществ по отношению к остальным методам соединений.

Во-первых, производительность процесса. Используя индукционный метод, в качестве способа нагрева, можно достигать производительности до порядка тысяч изделий за рабочую смену.

Во вторых, гибкость. В отличие от любого типа сварки, в технологии пайки используются припой. Припой это материал для пайки с температурой

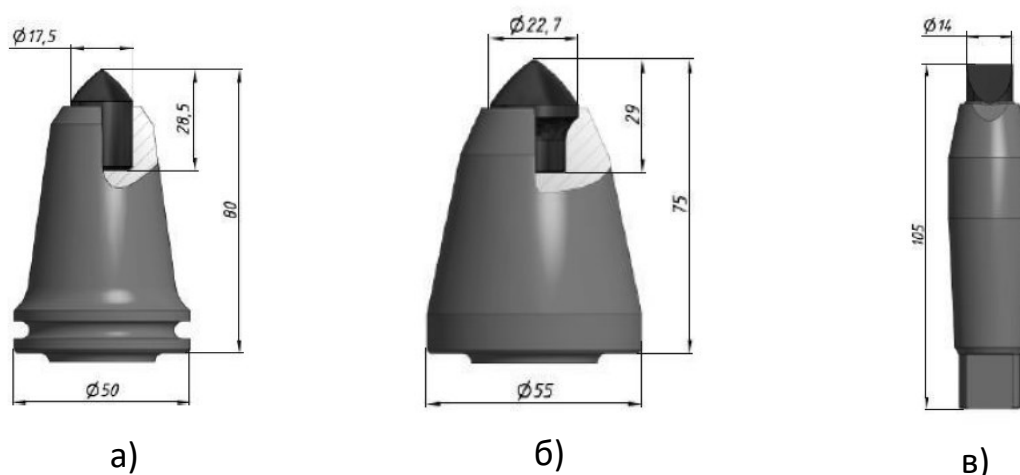
плавления ниже температуры плавления паяемых материалов [24]. Разные припои обладают разными температурными характеристиками, такими как температура солидус  $T_s$ , температура ликвидус  $T_l$  и температурный интервал плавления, что позволяет подобрать исходя из требований к изделиям и процессу нужный материал припоя.

В технологию пайки горных резцов можно включить несколько системообразующих составляющих, от которых в основном зависят конечные эксплуатационные свойства изделий:

- конструкция соединений;
- способ нагрева под пайку;
- материалы для пайки (припой и флюсы).

### Конструкция соединений

Анализируя продукцию крупнейших мировых [3,25] и отечественных [26,27] производителей можно сделать вывод о том, что вне зависимости от диаметральных размеров твердосплавных вставок все резцы можно разбить на три группы. Их условное обозначение и конструкция иллюстрируется рисунком 1.2.



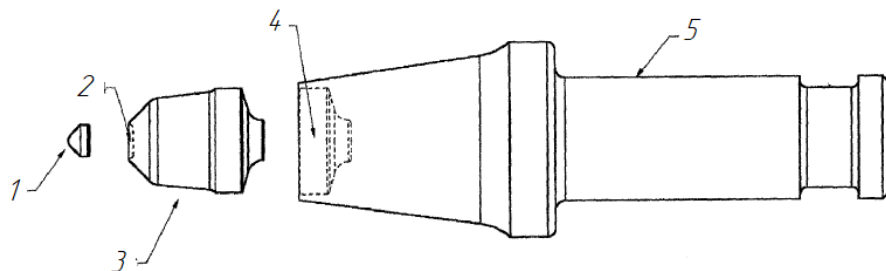
а) «цилиндрическое»; б) «грибковое»; в) «малоуглубленное»  
Рисунок 1.2 - Типовые соединения горного инструмента [26]

Как уже было сказано ранее, при изготовлении горного твердосплавного инструмента имеют место следующие тенденции: 1 - повысить стойкость инструмента к износу и увеличить продолжительность

его работы; 2 - сэкономить дорогостоящий твердый сплав за счет уменьшения протяженности шва, если в процессе работы инструмента износ корпуса мал, или изменения конфигурации паяного шва для обеспечения максимального увеличения протяженности износа корпуса.

Резцы с цилиндрической вставкой а) являются классическими. В резцах «грибкового» типа б) протяженность паяного шва увеличивается, а масса вставки (количество дорогого твердого сплава) уменьшается, если сравнивать вставки а) и б) одного типоразмера. «Грибковые» соединения также используются для увеличения срока службы резца. Механизм работы такой вставки описан в изобретении [28] и заключается в том, что ножка вставки находится глубже в теле державки. Такое положение вставки гарантирует, что при преждевременном износе державки не произойдет отрыва вставки.

Тип соединения определяется материалом породы, которая разрушается инструментом. Так резцы типа (в), так называемые РС или РСУ применяют при разработке солевых месторождений, где износ корпуса резца незначителен и не влияет на прочность паяного шва. Однако, при влажном бурении в условиях солевых месторождений создается высокоактивная коррозионная среда, накладывающая на применение некоторых припоев [29]. На рисунке 1.3 изображен резец с «малоуглубленным» соединением.



1 – твердосплавная вставка; 2 – паз крепления твердосплавной вставки;  
3 – кондуктор; 4 – паз крепления кондуктора; 5 – державка

Рисунок 1.3 – Горный резец с державкой-кондуктором [30]

В конструкции такого резца используется сменный кондуктор с рабочей твердосплавной вставкой. Таким образом, при износе кондуктора его можно заменить, используя ту же державку.

Согласно [24] паяные соединения бывают нахлесточными и стыковыми. В обоих соединениях предполагается наличие начала и конца паяного шва для выхода газовых пор, остатков флюсов и шлаков. Тип соединения, используемый в резцах для горнопроходческой техники, является комбинацией стыкового и нахлесточного соединения, являясь по своей сути тупиковым. С точки зрения пайки, тупиковое соединение является сложным, ввиду затрудненности выхода газовых и шлаковых включений из соединения.

Для облегчения удаления остатков флюса, газов и шлаков в конструкцию соединения может вноситься изменение. В патенте на изобретение [31] описан инструмент для разрушения минеральных и искусственных материалов, включающий твердосплавную вставку с рабочей частью хвостовиком с имеющим форму тела вращения, корпус с гнездом для размещения хвостовика вставки, отличающийся тем, что по меньшей мере часть поверхности хвостовика вставки имеет криволинейную форму, которая соответствует форме мениска, образованного расплавленным припоем в гнезде корпуса. Технический результат использования такой вставки заключается в повышении механической прочности на срез за счет повышения равномерности заполнения припоем паяльных зазоров и удалении из последних шлаков и флюсовых остатков.

В справочниках [23,32] имеется информация о том, что для облегчения выведения остатков флюсов, шлаков и газов, в донной части паяного соединения резца на державке можно изготовить сквозное отверстие, которое является выпором. Однако, примеров применения данной технологии в условиях массового производства нет. Известны случаи применения особых форм твердого сплава, обеспечивающих вывод газов и шлаков из соединения. Так, компания Vetek изготавливает твердые сплавы со шлицом

на цилиндрической поверхности. Данный шлиц увеличивает зазор на 250 мкм, что является достаточным для удаления флюсовых остатков [3].

### **Способ нагрева под пайку**

В условиях серийного производства самым распространенным способом нагрева заготовок под пайку являются индукционный и газопламенный [33]. Причем последний является устаревшим, в связи с такими особенностями как длительность нагрева и локальный перегрев державок при пайке, ведущий к обезуглероживанию стали.

В работах [8,34,35] авторы используют в качестве источника нагрева электронный пучок. В данных работах акцент делается на уменьшении остаточных напряжений в соединениях благодаря подбору оптимального режима пайки. Электронно-лучевая пайка в вакууме - дорогостоящая технология, которую целесообразно использовать только для специальных целей, например, для напайки тонких твердосплавных пластин на лопасти турбин в газотурбостроении.

В статье [12] был использован лазерный нагрев. Однако ввиду того, что процесс производился на воздухе и скорость охлаждения была довольно высокой, большинство образцов были получены с трещинами. Надежные соединения твердосплавных вставок с дисковой пилой из инструментальной стали были получены при помощи лазерной пайки на воздухе с использованием Nd: YAG и диодного лазера при мощности от 350 Вт до 800 Вт. Мощность CO<sub>2</sub>-лазера должна составлять от 1,2 кВт до 2,8 кВт из-за низкого поглощения излучения подложкой. Лучше всего для этой цели подходит диодный лазер с прямоугольным профилем луча. Пучок можно приложить либо к твердому сплаву (с трехслойным припоем серебро-медь-серебро, так и к стали (с лентой серебряного припоя). Оба метода позволяют избежать потери прочности стали в зоне паяного шва, несмотря на фазовое превращение в стали. Для лазерной пайки карбидов подходят стандартные флюсы [23].

Пайка в печи выполняется в восстановительной или защитной атмосфере, такой как водород, эндогаз, аргон или вакуум [36–38]. Печная пайка рекомендуется, когда инструменты с твердосплавными вставками производятся крупносерийно. Также можно использовать конвейерную печь с контролируемой атмосферой или муфельную печь закрытого типа. Твердосплавные наконечники с предварительно размещенной металлической фольгой и флюсом для пайки должны быть закреплены проволокой из нихрома (сплав Ni-20Cr) или приспособлением для оказания давления во время пайки. Однако, такой тип нагрева требует повторного нагрева под закалку и, ввиду этого, уступает индукционному в производительности.

### **1.1.2. Оборудование для изготовления резцов технологией пайки**

Индукционная пайка технически не сложнее, чем другие методы пайки, однако могут в ходе разработки технологических процессов пайки потребоваться дополнительные специальные знания. Достижение оптимальной работы системы при индукционной пайке требует не только правильного выбора генератора, но и соответствующей конструкции индукторов. Для максимальной производительности индукционного нагрева требуется хорошее согласование электрического импеданса между нагрузкой (узлом, индукторами и выводами) и генератором.

Для успешной индукционной пайки необходимо равномерное распределение тепла по всем элементам соединения. Это в первую очередь зависит от конструкции индукционного нагревателя, скорости нагрева, электро- и теплопроводности соединяемых материалов и массы паяемых узлов. Кроме того, успешная пайка зависит от выбора подходящего припоя и флюса, если он используется.

Основными компонентами системы для индукционной пайки являются источник питания и индукционная катушка (или индуктор). По желанию, в систему можно добавить обратную связь / контроль температуры.

Самым важным в индукционной системе является именно индуктор. Зачастую проектирование установок индукционного нагрева начинается именно с него, а электрические параметры генератора подстраиваются исходя из выбранной конструкции индуктора. Основными параметрами индукционных установок с точки зрения пайки являются частота  $f$  (кГц) и ее мощность  $P$  (кВт). На рисунке 1.4 изображена схема с характеристиками индукционных генераторов и их основными параметрами, в зависимости от типов генератора.

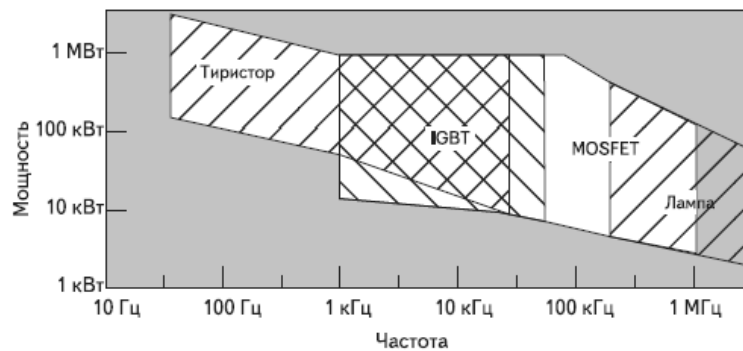


Рисунок 1.4 – Типы и характеристики инверторов для индукционного нагрева [39]

С точки зрения пайки, частота генератора главным образом влияет на глубину проникновения электромагнитного поля в заготовку, а это в свою очередь влияет на динамику распределения теплового поля в заготовке. В связи с этим, общепринято, что для пайки крупногабаритных деталей используются транзисторные индукционные генераторы с диапазоном частот 25-100 кГц [32]. Мощность установок подбирается исходя из габаритов детали и требуемой температуры и скорости нагрева.

В научных работах по индукционной пайке твердых сплавов со сталями, например в [40,41] паяются образцы простой, цилиндрической формы. Зачастую они имеют форму бобышки или квадрата. В соответствии с этим, в научных работах применяются индукторы простой формы, в виде кольца с различным количеством витков.

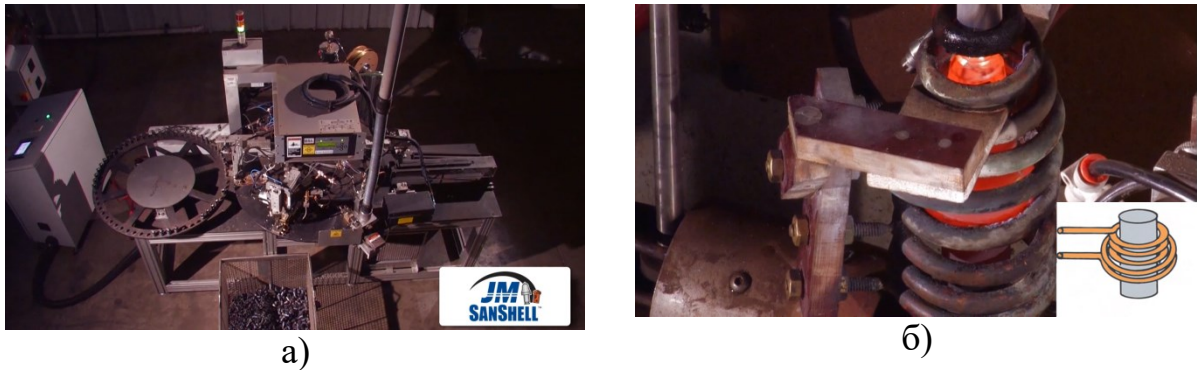


Любые отклонение от цилиндричности, резкие переходы между диаметрами, проточки, ребра и тонкие стенки являются концентраторами магнитного и электрического полей. Как иллюстрирует рисунок 2, реальные изделия, имеют большие габариты и более сложную форму, по сравнению с теми, что представлены в научных статьях. Поэтому для пайки горного инструмента применяются индукторы более сложной компоновки, установки, оснащенные которыми, представлены на рисунках 1.5-1.7. В добавок к этому для большинства типов резцов горнопроходческой техники требуется термообработка после пайки, которую и позволяет совмещать применение индукционного нагрева [33].



Рисунок 1.5 – стационарная установка пайки резцов [39]

На рисунке 5 изображена установка индукционного нагрева, используемая при изготовлении опытных партий резцов и мелкосерийном производстве. Для нагрева используется обычный кольцевой многовитковый индуктор. Для фиксации хвостовиков державки конструируются примитивные оснастки. Однако большинство операций выполняется оператором, включая снятие и установку резцов, флюсование и т.п. Автоматизируется на таких машинах зачастую только запуск и остановка термического режима, который программируется на панели.



а) общий вид; б) зона нагрева с индукционным нагревателем  
Рисунок 1.6 – Карусельная автоматическая линия пайки резцов [42]

В условиях среднесерийного производства требуется большее количество автоматизации и механизации процессов. Поэтому возможно применение индукционных машин с карусельной подачей заготовок. Пример такой установки изображен на рисунке 1.6. В данных машинах используется шаговый конвейер карусельного типа. Технологический процесс пайки выглядит следующим образом. Оператор устанавливает в отверстия на карусели державки резцов. Флюсование происходит при помощи автоматического дозатора. Размещение припоя и твердосплавной вставки происходят при помощи роботизированного манипулятора. Разогрев детали происходит в многовитковом кольцевом индукторе. Индуктор выполняется в форме конуса таким образом, что нижний его виток подведен к хвостовику резца, а верхний на уровне твердосплавной вставки. Такую сложную форму нагреватель имеет в связи с тем, что термический цикл совмещает в себе и пайку и закалку. Детали подаются в индуктор снизу вверх. После термического цикла происходит ручной сброс паяных изделий в закалочную ванну.

Самыми производительными установками считаются линейные конвейерные линии пайки резцов. Пример такой линии изображен на рисунке 1.7. Установки состоят из следующих основных блоков:



Рисунок 1.7 – Конвейерная линия пайки резцов со схематичным изображением индукционного нагревателя [43]

- блок нагрева (индукционный генератор для пайки и закалки);
- конвейер;
- закалочная ванна;
- пульт управления.

Сборка под пайку (флюсование, укладка припоя и установка твердосплавной вставки) могут осуществляться как вручную, так и автоматически. Зачастую этим занимается обслуживающий персонал. Оператор устанавливает резцы в стаканы на конвейеры. Для того, чтобы не происходило сильного износа от нагрева в индукторе, стаканы изготавливаются из парамагнитных металлов. Установленные в стаканы резцы движутся по конвейеру и попадают в зону нагрева. Индуктор таких установок выполняется в виде длинной рамки с приподнятыми вверх краями. В зависимости от изделия, мощности установки и других технологических параметров индуктор может иметь 2,3 или 4 витка и быть в длину от 0,5 до 1 м. В зависимости от массы изделий процесс пайки и закалки может происходить либо в одном, либо в двух индукторах.

## **1.2. Материалы, применяемые при изготовлении паяных горных резцов**

Твердосплавный породоразрушающий инструмент состоит из стальной державки и закрепленной в ней методом высокотемпературной пайки

твердосплавной рабочей вставки, как было отмечено в главе 1.1. Зачастую пайка ведется в воздушной атмосфере на индукционных машинах. Материалы, используемые при изготовлении, описаны в работе ниже, их можно разделить на следующие группы:

- стали;
- твердые сплавы;
- флюсы;
- припой.

### **1.2.1. Стали, используемые при изготовлении твердосплавного инструмента**

Поскольку твердый сплав достаточно дорог и его применение должно быть экономически оправданным, у крупных инструментов, узлов машин и приборов делаются из твердого сплава только детали, непосредственно подверженные высоким нагрузкам. Например, у режущих инструментов твердым сплавом оснащается только режущая часть, а остальные части делаются из стали. В качестве материала для державки обычных токарных и строгальных инструментов применяют углеродистую сталь или сталь, легированную марганцем, прочностью порядка 700 МПа. Применение низкопрочных сталей может привести к поломке твердосплавной пластинки или разрыву спая. Для инструментов с большим вылетом рекомендуются державки из тяжелых металлов или из спеченной стали, пропитанной медью. Эти державки отличаются хорошими амортизирующими свойствами [44].

Для инструментов, державки которых подвергаются особо высоким нагрузкам в отношении прочности, жаропрочности или износа (узкие резцы для шпоночных канавок, спиральные сверла, фрезы, зенкеры, развертки и т. д.), следует применять углеродистые стали высокой прочности, легированные инструментальные стали или низколегированные быстрорежущие стали [45]. При этом иногда требуются особые методы пайки и обработки. В таблице 1.1 приведены марки и режимы

термообработки основных сталей, используемых при изготовлении державок. В таблице 1.2 представлены механические свойства сталей указанных в таблице 1.1 .

Таблица 1.1 – Режимы термообработки сталей, используемых при изготовлении державок горного инструмента [1,46]

Марка стали	Термообработка по ГОСТ 4543-71
45	Закалка с 830-850°C в воду. Отпуск 500°C
40X	Закалка с 815-830°C в масло. Отпуск 190-200°C
45XH	Закалка с 820°C в масло или воду. Отпуск 200°C
30XГСА	Закалка 880-900°C в масло или эмульсию. Отпуск 280-310°C
18X2H4BA	Закалка с 950°C в масло или эмульсию. Отпуск 500°C
09Г2С	Закалка с 860°C в масло или воду. Отпуск 200°C

Таблица 1.2 – Механические характеристики корпусных сталей после термообработки [47]

Марка стали	Твердость	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
45	285HB	730	830	12
40X	53 HRC	1560	1760	8
45XH	54 HRC	1530	1690	8
30XГСА	50 HRC	1550	1760	12
18X2H4BA	<269HB	800	1050	12
09Г2С	150HB	265	490	17

По данным таблицы 1.1 и таблицы 1.2 можно заключить, что в основном стали, используемые при изготовлении корпусов, обладают высокими пределами прочности в закаленном состоянии. Материалы для корпусов должны обладать следующими требованиями: высокая прочность и теплопроводность; соблюдать и сохранять точность размеров и формы после обработки; качественно обрабатываться и гарантировать прочное соединение

с режущим элементом после сварки, наварки или напайки; обладать невысокой ценой; не должны содержать дефицитных элементов. В полной мере, этими качествами обладают конструкционные углеродистые стали – марки 40, 45, 50, и качественные стали – 40Х, 30ХГСА.

### **1.2.2. Твердые сплавы**

#### **Влияние среднего размера зерна на механические свойства твердых сплавов, используемых при изготовлении горного инструмента**

Хорошо известно, что средний размер зерна WC и содержание Co связки вносят решающий вклад в основные механические свойства твердых сплавов WC – Co: твердость, ударная вязкость, прочность на сжатие, прочность на разрыв, скорость роста трещины (transverse rupture strength или же TRS) [48,49].

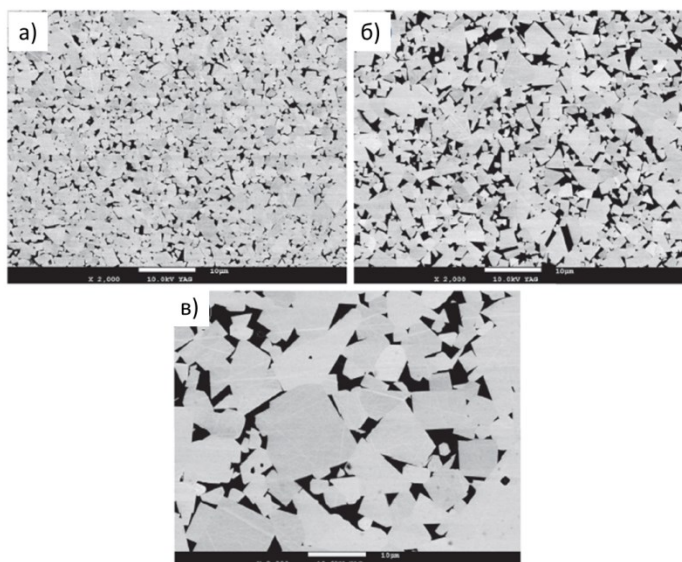
Большинство промышленных марок твердых сплавов WC – Co для горнодобывающей промышленности и строительства с различными комбинациями свойства, описанных выше отличаются различным содержанием Co и средним размером зерна WC. Влияние содержания Co и среднего размера зерна WC на механические и эксплуатационные свойства твердых сплавов WC – Co исследованы в работах [50,51]. Вязкость разрушения и твердость, являющиеся основными параметрами, определяющими производительность твердых сплавов, монотонно изменяются при изменении содержания Co и среднего размера зерна WC. Вязкость разрушения увеличивается, а твердость уменьшается с увеличением как содержания Co, так и среднего значения размера зерна WC. Повышение трещиностойкости возможно только за счет уменьшения твердости и, как следствие, износостойкости.

Согласно [52], зависимость прочности на сжатие от содержания Co в WC – Co со средним размером зерна WC от 1,4 до 5,3 мкм характеризуются максимумом при 4,5–6 мас.% Co. Несмотря на то, что максимальная прочность на сжатие достигается при среднем зерне WC размером 1,4–1,7

мкм, существенного снижения прочности на сжатие при дальнейшем уменьшении среднего размера зерна WC не происходит. Твердые сплавы WC – Co для ударного бурения должны иметь оптимальное сочетание прочности на сжатие, вязкости разрушения и твердости, достигаемое при содержании Co 6 мас.% и среднем размере зерна WC порядка 1,4–1,9 мкм. В таблице 1.3 приведены данные по механическим свойствам твердых сплавов, используемых при изготовлении горного инструмента, а на рисунке 1.8 показаны типичные микроструктуры.

Таблица 1.3 – Механические характеристики твердых сплавов, используемых при изготовлении горного инструмента [53]

Марка сплава	Химический состав, мас.%		Характерный размер зерна	Микротвердость		TRS, МПа <sup>-2</sup>	Предел прочности на сжатие, МПа	Ударная вязкость, МПа·м <sup>1/2</sup>
	Co	WC		HV <sub>10</sub>	HRA			
T6	6	94	средний	1450	90,6	2400	4500	12,7
B20/H 8	8	92	средний	1250	88,7	2700	4000	14,6
BH9/H 9	9	91	средний	1250	88,7	2600	4000	14,6
B25/G 10	10	90	средний	1200	88,2	2800	4000	14,6
B30/J1 1	11	89	средний	1150	87,7	2700	3900	15,2
B40/G 15	15	85	средний	1050	86,5	2800	3600	16,3
B15N	6,5	93,5	крупный	1100	87,2	2200	3600	16,3
B20N	8,6	91,4	крупный	1050	86,5	2300	3500	16,9
B25SN	9,5	90,5	крупный	1050	86,5	2300	3500	16,9



а) WC-6Co средний размер зерна; б) WC-8Co средний размер зерна; в)  
WC-8Co крупный размер зерна

Рисунок 1.8 – Типичная микроструктура твердых сплавов при  
увеличении 2000 [49]

Присутствие свободного углерода в структуре (слишком высокое содержание углерода в смеси для спекания или нарушение технологических режимов спекания), либо карбида в структуре твердого сплава свидетельствует о слишком низком содержании углерода, что приводит к уменьшению прочности сплава и ухудшению его характеристики как режущего инструмента. Структура должна быть плотной с очень незначительным числом пор или неметаллических включений [54].

С точки зрения паяемости твердые сплавы, на основе карбида вольфрама можно разделить на 2 группы:

- твердые сплавы без добавок;
- твердые сплавы с ингибиторами роста зерна.

Все сплавы первой группы хорошо смачиваются припоями, пригодными для пайки твердых сплавов. Краевой угол смачивания  $\theta$  имеет линейную нисходящую зависимость от содержания кобальта в твердом сплаве.

В сплавы второй группы добавляют ингибиторы роста зерна, такие как карбиды хрома, титана и марганца. Добавление таких карбидов уменьшает



средний размер зерна WC, однако негативно влияет на паяемость: для пайки таких твердых сплавов припой должны содержать активные элементы, такие как титан, хром и марганец, которые снижают поверхностную энергию расплава [55].

### **Механизм разрушения твердых сплавов в процессе работы горного инструмента**

Твердые сплавы широко используются в качестве режущих элементов в инструменте, используемом при бурении нефтяных и газовых скважин, инженерно-геологических работах, добыче угля и руды, различных строительных работы, таких как проходка тоннелей, снятие асфальтного покрытия при дорожных работах, рытье траншей, стабилизации грунта. Можно выделить две следующие основные области применения твердых сплавов в горнодобывающей промышленности и строительстве. Подробное описание условий применения твердых сплавов для горнодобывающей и строительной промышленности описано в монографиях [56,57].

Механизм износа твердых сплавов при бурении горных пород в настоящее время подробно изучен. Результаты работ по износу твердых сплавов при добыче полезных ископаемых резюмированы в работе [58].

Современные результаты работ по износу и разрушению твердых сплавов в горном инструменте описаны в [59]. Согласно результатам этой работы, наиболее важными макромеханизмами износа WC – Co при бурении горных пород являются:

- изломы, возникающие при ударах;
- выкрашивание в результате усталости при ударном воздействии;
- абразивный износ;
- термическая усталость.

Ударный и ударно-усталостный износ наиболее важны при бурении твердых горных пород ударными методами; абразивный износ наиболее важен при бурении более мягких абразивных пород; термическая усталость наиболее важна для высокотемпературных пород, таких как железные руды.

Авторы [59,60] обнаружили, что температура в приповерхностном слое твердосплавных пластин может достигать или даже превышать температуру плавления кварца, что приводит к проникновению мелких частиц кварца в WC – Co и их перемешиванию с Co связкой в структуре твердых сплавов.

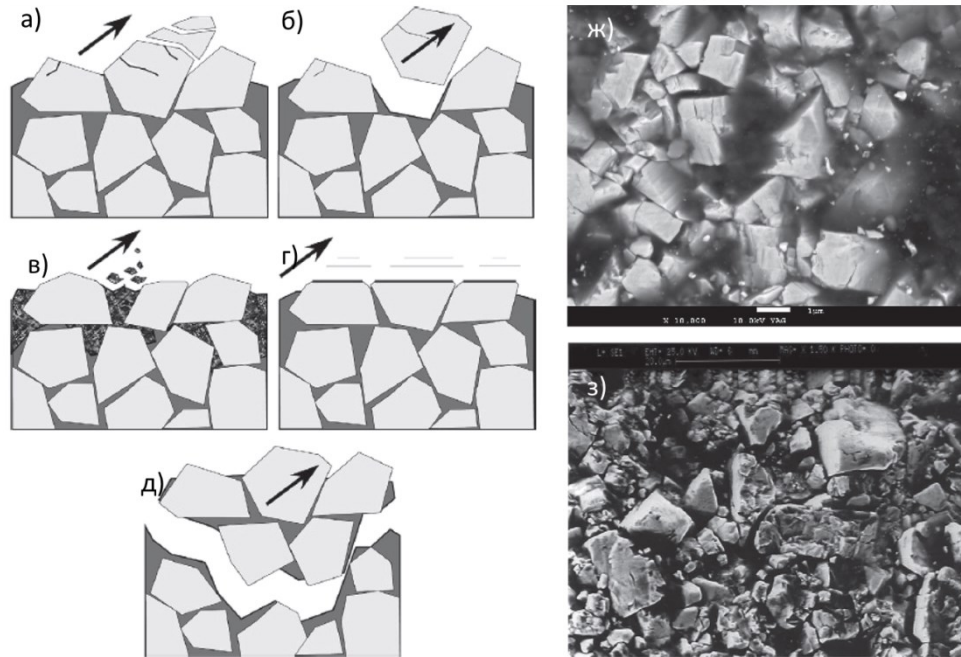
Согласно [60], к основным микромеханизмам износа и деградации структурно-фазового состояния твердых сплавов при бурении горных пород, которые схематически показаны на рисунках 8 а) – 8 з), можно отнести:

- измельчение зерен WC и выделение осколков;
- отделение цельных зерен WC и их удаление с изношенной поверхности;
- вымывание со связки, смесью образовавшейся в результате проникновения породы в связующее;
- трибохимический износ: соскабливание и стачивание корродированных или окисленных поверхностных слоев на WC;
- отделение стружки WC – Co, содержащей несколько зерен WC.

Помимо этих механизмов, два следующих механизма износа также могут играть важную роль во время горных работ:

- экструзия и удаление связки;
- истирание отдельных зерен WC.

На рисунке 1.9 д) хорошо видно удаление связующего, истирание отдельных зерен WC, следы отслоения целого зерна WC или их агломератов, а также дробление твердого сплава в результате ударного бурения кварца. На Рисунке 1.9 ж) также хорошо видно, что кобальтовое связующее избирательно изнашивается, обнажая зерна WC.



а) скалывание зерен WC и выброс осколков; б) отделение целых зерен WC или их частей, теряющих свои позиции в микроструктуре; в) вымывание связки горной породой; г) трибологический износ; д) выкрашивание фрагментов; ж) типичная картина износа при бурении кварцита твердым сплавом WC-6Co; з) износ Co связки при дорожных работах

Рисунок 1.9 - Схематическое изображение пяти наиболее важных механизмов износа твердых сплавов при добыче полезных ископаемых [61]

При добыче угля, абразивный износ и термическая усталость относительно незначительны, однако во многих случаях пласты угля расположены между слоями песчаника, который является чрезвычайно теплогенерирующей породой. При резке песчаника инструмент нагревается до очень высоких температур, что приводит к термической усталости. Во многих случаях, например в тоннелях нельзя использовать водяное охлаждение, тогда используется не такое эффективное спрей охлаждение для подавления пылеобразования, так что температура резания на поверхности твердого сплава может быть чрезвычайно высокой. В результате такого воздействия образуется сеть трещин термической усталости, которая называется в литературе как «змеиная кожа», которая во многих случаях

является основным механизмом преждевременного выхода из строя режущего инструмента [57].

### **Применение покрытий.**

Покрытия широко применяются для улучшения механических свойств твердого сплава. В основном твердый сплав покрывают для уменьшения трения при резании. Покрытия в таком случае работают как термобарьер и препятствуют перегреву резца [62,63]. Либо покрытия применяются для увеличения микротвердости и износостойкости твердых сплавов [64–66]. В основном авторами изучаются либо керамические покрытия, например карбонитриды титана в различных стехиометрических соотношениях, как указано в работах выше. Либо используются покрытия, позволяющие облегчить процесс пайки за счет нанесения припоя заранее в виде пленки [67].

### **1.2.3. Флюсы**

Исследований, направленных на изучение высокотемпературных флюсовых материалов немного. Это связано с функцией флюсов. Интерес исследователей в области пайки направлен в первую очередь на получение высоких механических свойств, которые в свою очередь достигаются подбором припоев и режимов процесса. В конечном счете, в ходе исследований происходит корреляция физико-механических свойств с микроструктурой паяных соединений. Роль флюса же в процессе заключается в создании благоприятных условий для заполнения припоем паяльного зазора: удаления оксидов с паяемых материалов и предотвращения их от окисления. Считается, что существует базовый набор флюсов, подбирая которые можно решить поставленную задачу.

Химический состав флюсов для пайки имеет свойство изменяться во время пайки. Скорость реакции флюса с кислородом, оксидами, благородными металлами, припоями и любыми посторонними материалами увеличивается с увеличением температуры и количества флюса.

Поэтому ингредиенты флюса должны тщательно подбираться, чтобы соответствовать всем требованиям, предъявляемым к пайке, включая время выдержки при температуре.

Воздействие флюса на основной металл должно быть сведено к минимуму, пока флюс удаляет оксиды металлов или другие загрязнения, чтобы обеспечить формирование соединения. Наиболее распространенные ингредиенты минеральных флюсов:

1. бораты (натрий, калий, литий и т. д.);
2. плавная бура;
3. фторбораты (калий, натрий и т. д.);
4. элементный бор;
5. фториды (натрий, калий, литий и т. д.);
7. кислоты (борная, прокаленная борная) [68].

Пайку твердых сплавов обычно проводят в воздушной атмосфере. При проведении пайки на воздухе используют флюсы. Составы основных флюсов для пайки твердых сплавов со сталями приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Химический состав флюсов для пайки твердых сплавов [23,32]

Марка флюса	Активные компоненты	Температурный интервал активности, °С
200	$H_3BO_3; Na_2B_4O_7; CaF_2$	850 – 1150
201	$B_2O_3; Na_2B_4O_7; CaF_2$ ; Лигатура (48Al48Cu4Mg)	850 – 1150
Ф100	$H_3BO_3; K[BF_4]; WO_3; CoO$	900 – 1100
FB3-D	$Na_2B_4O_7$	760 – 1205
FB3-E	$Na_2B_4O_7$	565 – 870
FB3-K	Бораты щелочных металлов	760 – 1205

В зависимости от вида активного компонента и его содержания в составе флюса в составе флюса происходит варьирование следующих

параметров: активность и время работы. Флюсы, содержащие фторбораты щелочных металлов, являются более активными, однако их время активности не велико, при длительном нагреве такие флюсы будут создавать не удаляемые флюсовые остатки, препятствующие растеканию припоя. Флюсы, содержащие бораты являются менее активными. Если сравнить 2 класса флюсов, помимо активности и времени активности разницей между ними будет еще и вязкость. Боратные флюсы при всех своих флюсах являются более вязкими: в ходе расплавления образуются боратные стекла, которые могут быть трудноудаляемыми в процессе пайки, особенно из тупиковых соединений [69].

При пайке твердых сплавов группы WC-Co с большим содержанием кобальта припоями на основе меди при использовании флюсов, составы которых указаны в таблице 9, наблюдается хорошая смачиваемость паяемой поверхности расплавленными припоями. В результате получается паяный шов необходимой прочности [70].

Иная картина наблюдается при пайке сплавов группы WC-TiC-Co и WC-Co с малым содержанием кобальта. Некоторые партии этих сплавов не удается припаять к стали, несмотря на соблюдение всех требований, предъявляемых к паяемым поверхностям.

Эти затруднения могут быть преодолены двумя способами: использованием флюса марки Ф100 и подготовкой твердого сплава к пайке методом окисления и использованием после этого в качестве флюса обезвоженной буры.

Флюс Ф100 состоит из фторбората калия ( $\text{KBF}_4$ ) 46,5%, тетрабората натрия ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) 36,5%, вольфрамового ангидрида ( $\text{WO}_3$ ) 13,5% и окиси кобальта ( $\text{Co}_2\text{O}_3$ ) 3,5%. Температура его плавления  $500^\circ\text{C}$ , интервал активности  $900-1100^\circ\text{C}$ .

При использовании этого флюса площадь растекания припоев на основе меди по поверхности твердых сплавов различных марок, в том числе и без вольфрамовых, резко возрастает.

Использование флюса Ф100 позволяет увеличить площадь растекания припоя по поверхности твердого сплава различных марок в несколько раз по сравнению с растеканием при использовании традиционных флюсов.

Недостатком флюса Ф100 является содержание в его составе фтористых соединений, которые токсичны.

Механизм действия флюса Ф100 изучен недостаточно, но, по-видимому, заключается в том, что свободный углерод, находящийся в поверхностном слое твердого сплава и препятствующий растеканию припоя, взаимодействует с окислами вольфрама и кобальта с последующим механическим вытеснением продуктов реакции расплавленными припоями.

#### **1.2.4. Припои, используемые для пайки горного инструмента**

Припои, используемые для соединения твердых сплавов со сталями и применяемые при изготовлении инструмента можно разделить на серебряные и бессеребряные.

Инструментальные серебряные припои делятся на системы:

- Ag-Cu-Zn-Cd;
- Ag-Cu-Zn, легированные Ni, Mn.

#### **Применение серебряных припоев для пайки твердых сплавов.**

В состав серебряных припоев системы Ag-Cu-Zn-Cd входит кадмий. Химический состав таких сплавов приведен в таблице 1.5. Кадмий очень сильно снижает температуру плавления припоев, одновременно увеличивая их жидкотекучесть [71]. Установлено, что кадмий в среднеплавких припоях, имея низкое значения давления насыщенных паров, легко испаряется в процессе пайки, загрязняя рабочую атмосферу. Известно, что кадмий относится к категории особо вредных для здоровья веществ, так как пары окиси кадмия являются канцерогеном [72]. В настоящее время как у нас в стране, так и за рубежом кадмий содержащие припои заменяются на бескадмиевые.

Таблица 1.5 – Серебряные припои системы Ag-Cu-Zn-Cd [32]

Марка	Состав, % (по массе)					Температура, °С	
	Ag	Cu	Zn	Cd	Остальное	T <sub>sol</sub>	T <sub>liq</sub>
ПСр50Кд	49,5-50,5	15-17	15-17	Ост.	-	625	640
ПСр40	39-41	16-17,4	16,2-17,8	Ост.	Ni 0,2-0,3	590	610
ПСр44	43-45	26-28	14-16	7-9	Ni 1,5-2,5 Mn 2,5-3,5	650	800

В таблице 1.6 представлены данные по химическим составам кадмий содержащих припоев, изготавливаемых по иностранным стандартам.

Таблица 1.6 – Серебряные припои США и Германии системы Ag-Cu-Zn-Cd [23]

Марка по DIN 8513	Марка по ASTM	Состав, мас.%					Температура, °С	
		Ag	Cu	Zn	Cd	Остальное	T <sub>sol</sub>	T <sub>liq</sub>
L-Ag20Cd	-	30	Ост.	25	15	Si 0,1-0,2	605	765
L-Ag30Cd	-	30	Ост.	21	21	Si 0,1-0,2	600	690
L-Ag40Cd	-	20	Ост.	21	20	-	595	630
L-Ag50CdNi	B-Ag3	50	15,5	-	16	Ni 3	645	690

В состав серебряных припоев системы Ag-Cu-Zn вводят никель и марганец, что обеспечивает увеличение прочности шва при вибро- и ударных нагрузках инструмента, хорошую смачиваемость [41]. Химические составы этих сплавов приведены в таблице 1.7.



Таблица 1.7 – Серебряные припои США и Германии системы Ag-Cu-Zn, легированные Ni, Mn [23]

Марка	Марка по DIN 8513	Марка по ASTM	Состав, мас.%				Температура, °C	
			Ag	Cu	Zn	Остальное	T <sub>sol.</sub>	T <sub>liq.</sub>
Degussa 4900	L-Ag49	-	49	16	23	Ni4,5 Mn7,5	625	705
Degussa 2700	-	-	27	38	20	Ni5,5 Mn9,5	650	830
L-Ag27	L-Ag27	-	27	39	Ост.	Ni5 Mn9	680	830
L-Ag49 Mn7	L-Ag49 Mn7	-	49	17	Ост.	Ni4 Mn7	630	705

Микроструктура паяных соединений сталь\твердый сплав, полученных при помощи серебряных припоев является многофазной. Исследованию как металлографических особенностей эволюции структурно-фазового состояния, так и его корреляции с механическими свойствами посвящено множество работ.

В исследованиях [40,73,74] исследовалась микроструктура и свойства паяных соединений стали Cr-Mn/WC-Co полученных при помощи припоя L-Ag20Cd. Исследована эволюция микроструктуры во время пайки при различной толщине паяного шва и ее корреляция с прочностью на срез соединений. Анализ микроструктуры проводился на границе раздела соединений. Также изучалось поведение смачивания сплавов на подложке WC-Co при температуре 780 °C с различным временем выдержки. В работе было выявлено, что при увеличении времени пайки с 5 до 15 мин (при 780 °C) угол смачивания уменьшился с ~40° до ~35,5°. Микроструктура и качественная карта распределения элементов в поперечном сечении соединения показали, что поперек паяного шва образовывались три

отдельные области. Соединения в основном состояли из твердого раствора Cu-Zn, твердого раствора Ag-Cd и эвтектической структуры. Результаты испытаний на срез показали увеличение прочности паяных соединений за счет увеличения времени пайки. Максимальная прочность на срез  $\sim 93,5$  МПа была получена для соединения, паяемого в течение 15 мин с толщиной припоя 60 мкм. Было установлено, что основную роль в механизме упрочнения паяных швов, полученных при помощи серебряных припоев играют островообразные фазы твердого раствора Cu, которые равномерно распределены в зоне соединения. С увеличением времени выдержки и температуры пайки общая площадь упрочняющей фазы уменьшается, а механические свойства паяного соединения ухудшаются [75]. Увеличение прочности на сдвиг достигалось за счет оптимизации времени пайки и скорости охлаждения [7].

В работе [41] авторы исследовали паяные соединения WC-20Co с углеродистой сталью, полученные методом индукционной пайки. В статье использовались классические припои на основе серебра, легированные никелем и марганцем. Ni обладает значительной твердой растворимостью в Fe и Co и может легко образовывать твердые растворы в процессе пайки. Было установлено, что характер распределения Cu играет важную роль в механизме упрочнения. Также как и в работе [75] кристаллизация островообразной фазы на основе Cu в паяном шве вызывает эффект дисперсионного упрочнения из-за своей высокой твердости. Слои твердого раствора Cu и Ni на границе раздела припой- твердый сплав также увеличивают прочность паяного соединения. С увеличением температуры пайки и времени выдержки Ni, содержащийся в припое диффундировал на поверхность раздела твердый сплав-припой. Прочность на срез соединений увеличивалась при увеличении температуры до  $770^\circ\text{C}$ , но уменьшалась по мере дальнейшего увеличения температуры пайки и времени выдержки. Максимальная полученная прочность на срез составила 366 МПа. Механические свойства соединений в значительной степени зависят от

эффекта дисперсионного упрочнения островками Cu и эффекта усиления слоев твердого раствора Cu на границе раздела припой-твердый сплав диффундирующими туда никелем и марганцем. Соединения получают наилучшие механические свойства, когда работают оба механизма усиления. Таким образом, в данной работе говорится об увеличении механических свойств соединений при диффундировании кобальта из твердого сплава в паяный шов.

Авторы работы [13] также изучали механические свойства паяных соединений сталь-твердый сплав. Авторы отмечают, что при длительном (порядке 30 мин) времени пайки, в паяном шве образуются соединения  $Mn_3W_3C$ , которые оказывают негативное влияние на механическую прочность на срез. В работе отмечается, что уменьшение толщины паяного шва со 150 до 50 мкм приводит к ухудшению механических свойств в связи с тем, что количества расплавленного припоя при уменьшении толщины шва не достаточно для компенсации тепловых напряжений во время охлаждения. В то же время увеличение толщины шва с 150 до 400 мкм приводит к появлению некапиллярного зазора. Следствием этого являются усадка и образование пустотных дефектов во время кристаллизации.

Сплавы на основе серебра обладают более низкой температурой плавления, чем сплавы на основе меди, поэтому использование припоев на основе серебра всегда приводит к уменьшению разности коэффициентов термического расширения стали и твердого сплава. Уменьшение этой разности при условии, что остальные параметры остаются неизменными, всегда приводит к уменьшению остаточных паяльных напряжений. Однако использование припоев на основе серебра не всегда приводит к уменьшению остаточных паяльных напряжений вследствие того, что паяный шов при охлаждении сильно сопротивляется деформированию и в малой степени компенсирует разность изменения размеров твердого сплава и стали. Об этом свидетельствуют многие работы на тему моделирования остаточных напряжений, возникающих после пайки твердых сплавов со сталями, в

процессе охлаждения [76,77]. Главным же недостатком серебряных припоев, перечеркивающим все их плюсы для пайки тангенциальных резцов, является невозможность из-за низкой температуры ликвидус этих сплавов проведения закалки изделий.

### **Припой на основе меди для пайки инструмента.**

Использование недорогих припоев для получения соединений с высокими механическими и эксплуатационными является одной из основных проблем в процессе пайки. Среди припоев сплавы на основе меди являются материалами для пайки, которые широко используются в качестве замены дорогостоящих припоев на основе серебра, когда требуется более высокая температура пайки. Например, при совмещении процесса пайки и закалки инструмента. Предполагается, что при правильном выборе параметров пайки твердого сплава со сталью припоями на основе меди можно получить высококачественные соединения с механическими свойствами, приближающимися к соединениям спаянным припоями на основе серебряных сплавов [78].

### **Припой Cu-Zn**

Инструментальные припои на основе меди подразделяются на сплавы системы Cu-Zn и Cu-Mn с различными легирующими добавками. Медно-цинковые припои представляют собой сплавы двойной системы меди и цинка в различных соотношениях [71]. В качестве основных легирующих элементов в этих припоях используются Ni, Mn и Fe [79]. Состав таких припоев приведен в таблице 1.8.

Припой марки ПрМНМц 68-4-2 содержит относительно небольшое количество легирующих элементов, а введение в его состав никеля и марганца делает соединения, образованные припоем, достаточно прочными при нормальной и повышенной температуре. К недостатку припоя следует отнести то, что он не может формировать соединения с заданной толщиной паяного шва и требует высокой температуры пайки. Припой МНМц 68-4-2 рекомендуется для пайки с индукционным или электродоуплотнительным нагревом

всех марок твердых сплавов; хорошо растекается по паяемым поверхностям; по сравнению с припоем ЛМцЖ 57-1,5-0,75 обеспечивает более высокую прочность паяного шва. Рекомендуется для пайки металлорежущего инструмента, работающего в тяжелых условиях при повышенных температурах [33].

Припой ЛМцЖ 57-1,5-0,75 обеспечивает среднюю прочность паяных соединений инструментов около 206 МПа; хорошо растекается по паяемой поверхности в условиях флюсовой защиты фторборатными флюсами; в ряде случаев позволяет снизить уровень остаточных напряжений. Температура пайки с применением этого припоя составляет 930 °С и выше .

Припой ЛМцЖ 57-1,5-0,75 образует паяные швы нерегулируемой толщины; содержит большое количество примесей (до 0,5%), приводящих к потере прочности соединений при повышенных температурах и удельных нагрузках. Иногда твердосплавные пластины резцов, паяные этим припоем, отскакивают в начале их эксплуатации. Данный припой с учетом его особенностей лучше применять при пайке многолезвийного инструмента. В этом случае припой затекает в зазор после взаимодействия с флюсом, частично рафинируется и не так сказывается негативное влияние примесей на свойства паяных соединений.

Припой ЛНКоМц49-9-0,2-0,2 при комнатной температуре имеет весьма высокое временное сопротивление разрыву и ударную вязкость при хорошей пластичности. Предел текучести этого сплава в интервале температур от комнатной до 600 °С приблизительно вдвое меньше, чем временное сопротивление разрыву. Из-за высокой ударной вязкости этот припой применяется при изготовлении инструмента ударного действия для перфораторного бурения. Обеспечивает высокую прочность паяного шва, рекомендуется использовать при пайке инструмента с корпусами из сталей мартенситного класса.

Таблица 1.8 - Инструментальные припои системы Cu-Zn [32,33]

Марка припоя	Химический состав, мас. %							Температура, °C	
	Cu	Ni	Mn	B	Fe	Si	Zn	T <sub>sol.</sub>	T <sub>liq</sub>
ЛМцЖ57-1,5-0,75	56-58	-	1-2	0,07-0,15	0,5-1	0,1-0,2	Ост.	865	873
МНМц68-4-2	62-68	4-5	1,5-2,5	0,05	-	-	Ост.	915	975
ЛНМц60-9-5	59-61	8-10	4-6	0,03-0,1	1	0,2	Ост.	949	955
ЛНКоМц49-9-0,2-0,2	48-50	8-10	0,1-0,2	-	0,1-0,3	0,05-0,15	Ост.	924	955
Алармет 211	55-57	0,7-1,4	-	-	-	-	Ост. +Sn 6,7-7,3	800	830
ЛОК59-1-0,3	58-60	-	-	-	-	0,2-0,4	Ост. +Sn 0,7-1,1	880	890
ЛНМц49-9-0,2	48-51	8-10	0,1-0,3	-	-	-	Ост.	910	960
П47	43-45	2-4	9,5-10,5	0,05-0,25	-	-	Ост. +Sn 4 Al 0,3	820	850

Также существуют зарубежные припои системы Cu-Zn, составы которых приведены в таблице 1.9.

Таблица 1.9 – Зарубежные припой системы Cu-Zn [23]

Марка припоя	Химический состав, мас. %					Температура, °С	
	Cu	Ni	Mn	Si	Zn	T <sub>sol</sub>	T <sub>liq.</sub>
LMN3M	63-65	3-4	1,5-2	0,2-0,3	Ост.	890	930
LMN7	62-64	6-9	-	0,2-0,4	Ост.	890	950
L-CuNi10Zn42	49	10	-	0,2	40,8	890	920
High Temp 548	55	6	4	-	35	879	917
SHL939	56	8	2	-	26	856	960
CuZnMnCo	58	2Co	2	-	38	890	930

Зарубежные припои L-CuNi10Zn42 и High Temp 548 отличаются высокими прочностными характеристиками паяных соединений и хорошей растекаемостью по твердому сплаву и заполнением капиллярных зазоров, позволяя достигать минимальной пористости паяных швов с цилиндрическими вставками твердого сплава в отверстиях корпуса резцов. Эти припои нашли широкое применение при пайке резцов дорожных машин и горнопроходческого оборудования (РКС). В этих случаях применяют стали мартенситного класса, и процесс пайки совмещают с термообработкой инструмента в расплавах солей или специальной эмульсии [29].

В статье [80] авторы исследовали паяные соединения стали 4145 с твердым сплавом WC-8Co. Образцы были спаяны припоем RBCuZn-D (Cu-46Ag-9Ni) при температуре 960 °С со временем пайки 1; 2,5; 5; 7,5; 10 и 12,5 мин. В работе установлено, что взаимная диффузия Ni и Co приводит к образованию твердого раствора на границе раздела стали и высвобождению частиц WC на границе раздела припой - твёрдый сплав. Результаты рентгенофазового анализа подтвердили образование фаз твердого раствора и интерметаллида Co<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C в зоне паяных соединений, спаянных с временем выдержки 5 и 10 мин. Максимальная прочность на сдвиг 412 МПа была получена при времени пайки 5 мин. С увеличением времени пайки произошло снижение прочности, что было связано с увеличением

образования хрупкого соединения  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  и изменением химического состава зоны соединения. Максимальная прочность соединения, спаянная исследуемым припоем, конкурирует с прочностью соединений, спаянных с помощью припоев на основе Ag.

В работе [81] исследуется газопламенная пайка соединений WC-Co/сталь припоями на основе Cu. Было выявлено, что микроструктура соединения, полученного при помощи припоя Cu-Zn-Ni является эвтектической. Столбчатая  $\alpha$ -фаза зарождалась на границе и росла к центру соединения, а затем ее рост предотвращался  $\beta$ -фазой, содержащей вольфрам. Со стороны стали микроструктура соединения, спаянного припоем Cu-Zn, состоит из твердого раствора меди.

Таким образом, анализируя диаграммы состояния припоев системы Cu-Zn, можно сделать следующие выводы:

- при введении в припой никеля повышается коррозионная стойкость, прочность и вязкость. В процессе расплавления и выдержки при температуре пайки происходит взаимодействие жидкого припоя с кобальтом твердого сплава на границе раздела твердой и жидкой фаз. Никель-кобальтовый раствор при этом затвердевает на границе зоны контакта припоя с твердым сплавом, способствуя увеличению прочности соединений. Никель образует твердый раствор с медью и цинком, при этом расширяется область  $\alpha$ -раствора и измельчается структура сплава.
- железо в небольшом его количестве положительно влияет на эксплуатационные и технологические свойства припоев на этой основе, так как железо способствует образованию мелкозернистой структуры. Кроме того, в переходных зонах между припоем и сталью даже при отсутствии железа в припое наблюдается его положительное влияние на систему Cu-Zn вследствие незначительного растворения железа припоем.
- небольшие добавки алюминия в сплавы на основе меди с содержанием никеля и марганца значительно повышают эксплуатационные свойства твердосплавного инструмента.



- введение марганца в латуни повышает их горячую прочность; введенный в небольших количествах он также повышает пластичность припоя и снижает температуру его плавления. Снижение пластичности припоев таких систем начинается при содержании марганца более 4 мас. % [33].

### Многослойные припои для пайки инструмента

Многослойные припои (обычно трехслойные) представляют собой многослойную полосу, полученную совместной прокаткой заготовок из различных сплавов. Наружные слои многослойного припоя, плавящиеся в процессе пайки, имеют толщину не более 0,2 мм, так как при большей толщине возможно вытекание припоя из зазора. Эти слои припоя должны иметь температуру плавления значительно более низкую, чем внутренние слои многослойного припоя, не плавящиеся в процессе пайки и служащие компенсационными прокладками [55].

Для пайки металлорежущего инструмента был разработан трехслойный припой, не содержащий серебра, марки ТП-1. Этот припой представляет собой триметаллическую полосу, полученную прокаткой. Внешняя часть припоя толщиной 0,2 мм соответствует сплаву ЛНМц 50-2-2, с температурой ликвидус 872 С. Внутренний слой- демпфирующая прокладка из бронзы БрНБ7-0,5 0,4 мм, с температурой ликвидус 1126 С. Составляющие припоя ТП-1 приведены в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Химический состав и температура плавления сплавов, входящих в припой ТП-1 [33]

Марка припоя	Химический состав, мас. %						Температура, °С	
	Cu	Ni	Mn	Si	Zn	B	T <sub>sol</sub>	T <sub>liq</sub>
ЛНМц 50-2-2	29-51	1,5-2,5	1,5-2,5	0,1-0,2	Ост.	-	849	872
БрНБ 7-0,5	Ост.	6-8	-	-	-	0,3-0,5	1110	1126

Ключевым преимуществом трехслойного припоя является то, что он может компенсировать остаточные паяльные напряжения, возникающие ввиду разности ТКЛП стали и твердого сплава сильнее, чем все описанные припои, включая серебряные трехслойные припои.

Исключительные свойства трехслойного припоя ТП-1 заключается в том, что он при меньших усилиях, чем другие припои, может деформироваться во всем температурном интервале от температуры солидуса наружных слоев до комнатной. Это объясняется тем, что латунь ЛНМц50-2-2 от температуры солидуса 849 °С до комнатной имеет весьма низкий предел текучести. При дальнейшем охлаждении ниже 400 °С предел текучести этой латуни резко возрастает и становится приблизительно вдвое больше, чем у бронзы БрНБ 7-0,5.

Толщина паяного шва при использовании трехслойного припоя ТП-1 равна 0,7-0,8 мм, т. е. в пять-десять раз больше, чем принятая для металлорежущего инструмента. Увеличенная толщина паяного шва, так же, как и его низкий предел текучести, способствует снижению остаточных паяльных напряжений, так как при одинаковом перемещении стали относительно твердого сплава при большей толщине паяного шва будут меньше углы сдвига, а, следовательно, и напряжения в паяном шве.

Существует иностранный трехслойный припой Degussa 49/Cu, состоящий из Ag49;Cu27,5;Zn20,5 и добавок Ni 0,5 и Mn 2,5 мас. %. Припой имеет интервал температуры плавления 670-690 °С.

Припой марки Degussa 49/Cu представляет собой трехслойную композицию из серебряного припоя с промежуточной медной прокладкой. Это позволяет получать малонапряженные, прочные паяные швы с оптимальной гарантированной толщиной, равной 0,3 мм. При испытании на срез соединения, паянные припоем Degussa 49/Cu, разрушаются вязко [82].

Трехслойные припои отлично зарекомендовали себя при пайке твердых сплавов со сталями на плоских соединениях. Однако, ввиду особенности растекания, а именно образование адгезионного соединения только в месте

нахождения закладного элемента, данные припои на применимы к цилиндрическим паяным швам, где требуется затекание по нескольким плоскостям.

### 1.3. Сплавы системы Cu-Mn-Ni

#### 1.3.1. Анализ диаграммы состояния Cu-Mn-Ni с точки зрения разработки припоев

Исследования сплавов Cu-Mn-Ni проводятся довольно давно, а сами сплавы хорошо изучены в статьях [83–86]. Фазовый анализ сплавов из этой системы показывает, что в ней содержатся целые участки сплавов с структурой твердого раствора, обладающих температурой ликвидус, подходящей для пайки как коррозионно-стойких сталей, так и углеродистых. В основном эти сплавы находятся в медном углу диаграммы состояния сплавов с содержанием Mn до 30 %, Ni до 30 %,.. На основе этой системы существует множество как зарубежных, так и отечественных припоев, составы которых приведены в таблице 1.11 и 1.12. Некоторые припои дополнительно легируются такими элементами , как Cr, Zr, Fe и т.д. Механизм влияния элементов на структуру и свойства как самих припоев, так и паяных соединений полученных при их помощи в литературе отсутствует.

Медь и марганец с никелем образуют ряд твердых растворов [87]. Железо с марганцем также образует ряд твердых растворов и значительно повышает пластичность медно-марганцевых сплавов [88]. Введение в эти припои углерода, бора, кремния позволяет улучшить технологические свойства (растекаемость, смачиваемость) [86].

Таблица 1.11 – Припои системы Cu-Mn [37]

Марка припоя	Химический состав, мас. %				Температура, °C	
	Cu	Mn	Ni	Добавки	T <sub>sol</sub>	T <sub>liq</sub>
АНМц06-4-2	Ост.	1,5-2,5	3-4	0,5-0,6 Al	1050	1070

БрКоМц3-10	Ост.	9-11	-	2,5-3,5 Co	965	1024
П65	Ост.	27-28	4,5-5	1,3-1,6 Cr 0,2-0,4 Li <0,02 C	870	910
ВПР2	Ост.	22-26	5-6	0,8-1,2 Fe, 0,15-0,25 Li	960	980
ПМ17	Ост.	15-17	12-14	1,0-2,0 Fe, 0,2-0,3 B	870	940
ВПР4	Ост.	27-30	28-30	4-6 Co 0,15-0,3 Li 0,15-0,25 B 0,1-0,2 P	940	980

Таблица 1.12 – Припой системы Cu-Mn зарубежного производства [89]

Марка припоя	Химический состав, % по массе				Температура, °C	
	Cu	Mn	Ni	Добавки	T <sub>sol</sub>	T <sub>liq</sub>
CuMnNi2	86	12	2	-	970	990
CuMnNi9 (МНМц 9-23,5)	67,5	23,5	9	-	925	950
Bronze 704	86,8	11	2,2	-	915	965
High Temp 095	52,5	38	9,5	-	880	925
High Temp 870 (L-CuMnCo3)	87	10	-	Co 3,0	960	1030
CuNiB	97	-	3	B 0,02	1081	1101
CuNiSi	96,8	-	2,6	Si 0,6	1090	1100

В работе [83] были изучены структуры и свойств никелевых сплавов системы Ni-Mn-Cu в зависимости от состава и технологии литья. Из анализа построенной соответствующей фазовой диаграммы, представленной на рисунке 1.10, что области интерметаллических фаз NiMn и Ni<sub>3</sub>Mn остаются в трехкомпонентной системе до определенного содержания меди.

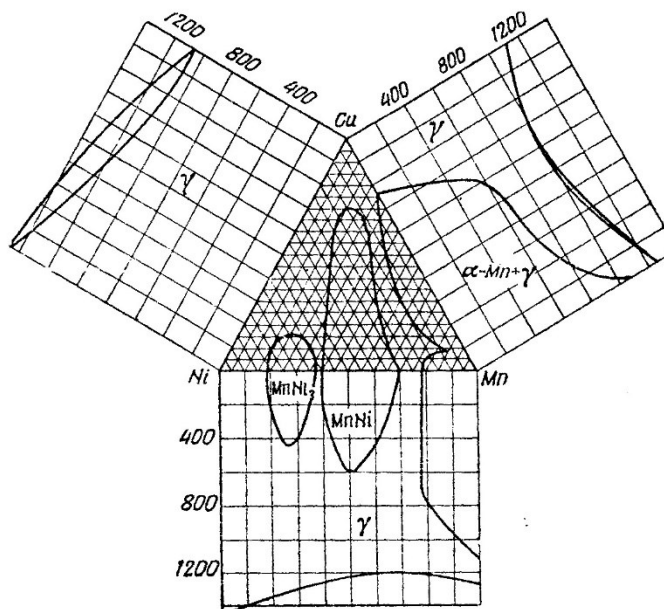


Рисунок 1.10 – Фазовые области в сплавах системы Ni-Mn-Cu в сравнении с фазовыми областями в бинарных системах [83]

Микроструктура сплавов с низким содержанием марганца до 20 мас.% состоит из одной фазы как в литом, так и отожженном состояниях. Границы зерен четко различимы. С увеличением количества Mn до 25 мас.% в центре слитков на междендритных участках выделяется вторая фаза. Отжиг при 950 °C восстанавливает гомогенную структуру.

При увеличении содержания марганца до 30 мас.%, количество второй фазы увеличивается. Анализ фазовой диаграммы Ni-Mn-Cu показывает, что при одинаковом соотношении никеля, марганца и меди, охрупчивание и упрочнение сплавов происходит в результате образования второй фазы.

Для всех припоев системы Cu-Mn-Ni микротвердость вблизи границы твердого сплава и вблизи границы стали больше, чем у середины паяного шва. По-видимому, диффузия вольфрама из твердого сплава и железа из

стали в эти пограничные области приводит к увеличению твердости этих областей. В системе Cu-Mn наиболее низкой температурой плавления (870 °C) обладает сплав с 65 мас. % Cu и 35 мас. % Mn, который часто используется в качестве базового при разработке припоев [90]. Поверхностная пленка припоев этой системы состоит из нескольких слоев оксидов, имеющих разную степень стабильности, поэтому она полностью восстанавливается только в водородной атмосфере печи с точкой росы не ниже -55 °C при температуре 1000 °C [91].

Эта особенность не позволяет использовать припои этой системы при всех способах пайки инструмента без легирования другими компонентами для придания им необходимых физико-механических и технологических свойств. Основным легирующим компонентом этой системы является никель. Небольшое количество алюминия значительно повышает прочность и пластичность медно-марганцевых сплавов при нормальной и повышенных температурах, что важно для инструментальных припоев[37].

### **1.3.2. Применение сплавов системы Cu-Mn-Ni в промышленности**

В работе [92] рассматриваются механические и коррозионные свойства сплавов меди с марганцем и никелем. Авторы заключают, что однофазные сплавы демонстрируют высокую прочность наряду с хорошей пластичностью, что делает их пригодными для глубокой вытяжки. Таким образом, сплавы системы Cu-(22-25)Mn-(4-10)Ni могут быть заменять обычные латуни, в таких изделиях как болты и стяжки, валы, заклепки, клапаны, корпуса автомобильных ламп, цоколи ламп, бытовая и промышленная сантехника и др. Сплавы Cu-Mn-Ni могут быть использованы для замены марганцевой бронзы там, где коррозионные условия не очень тяжелые.

Сплав МНМц43-0,5 копель, используется в качестве термопарной проволоки. Из сплава МНМц3-12 манганин изготавливаются приборы электросопротивления с температурой работы до 100 °C, а также другие

точные электроизмерительные приборы. Константан МНМЦ40–1,5 применяется для изготовления реостатов, термопар, нагревательных приборов с рабочей температурой до 500 °С. Химические составы регламентируются ГОСТ 492–73.

В качестве припоев, помимо пайки горного инструмента, обозреваемые сплавы применяются для пайки коррозионностойких сталей. В монографии [86] описано практическое применение припоя ВПР 2 и ВПР 4 в виде закладных элементов при пайке узлов газотурбинных двигателей (ГТД) летательных аппаратов. Припой ВПР 4 применяется при пайке распылительных форсунок, а также лопаток направляющего аппарата.

Применение проката припоя П65 для пайки узлов криогенной техники из коррозионностойкой стали описано в работе [93]. В работе [94] припой П65 использовался для пайки блоков ТЭНов, используемых в парогенераторах АЭС.

### **1.3.3. Формы применяемых припоев**

В зависимости от механических и технологических свойств сплавов-припоев, существует несколько принципиально разных форм продукции:

1. ленты и проволоки;
2. порошковые системы;

Прокат изготавливают из сплавов с низким сопротивлением деформации. Зачастую это сплавы систем Cu-Ag и Cu-Zn. Основными технологиями изготовления таких припоев являются традиционные методы обработки металлов давлением: прокатка, волочение, горячая и холодная экструзия. Данный тип продукции обладает неоспоримыми преимуществами перед остальными.

Во-первых, это возможность изготовления любых типоразмером лент и проволок с возможностью калибровки, что в свою очередь облегчает дозирование припоя путем подбора массы при штамповке закладных элементов.

Во-вторых, преимуществом компактного материала является его экологичность. Такой материал не пылит, при перемещении между тарами.

Порошковые системы. Порошки из сплавов припоев изготавливаются в тех случаях, когда изготовление проката или невозможно, или же там, где необходимо достичь экономической выгоды. Так, например, порошки изготавливают из сплавов, содержащих большое количество хрупких эвтектик, таких как припой системы Ni-Cr-Si-B. С другой стороны порошки изготавливают из сплавов с высоким сопротивлением деформации. Например припой системы Cu-Mn-Ni(Co) возможно изготовить и методами обработки металлов давлением, но это будет очень трудоемко из-за необходимости полного отжига сплавов после каждой итерации процесса .

Существует нескольких видов порошковых систем. Первым типом являются порошки в чистом виде. Однако такие припои не применяются при пайке на воздухе и-за сильного окисления.

Второй тип это пластифицированные композиционные материалы на основе припоев. Такие пластифицированные композиты состоят из полимерной матрицы и порошкового припоя. Чаще всего такие композиции используются для вакуумной пайки ответственных узлов

Паяльная смесь – это смесь порошка припоя и порошкового же флюса. Металлический порошок припоя и неметаллический порошок флюса имеют различную в несколько раз плотность. Традиционно паяльные смеси приготавливают из порошков осколочной, чешуйчатой и дендритной формы. Такие порошки имеют пониженную по сравнению со сферическими насыпную плотность. Это приводит к тому, что флюсовому порошку с гораздо более низкой плотностью легко удержаться в пространстве между частицами.

Самым главным плюсом порошковых систем является возможность изготовления порошков из сплавов любых составов. Немаловажным является и то, что порошковые системы очень просто дозировать. Существует



множество типов оборудования для дозирования порошковых материалов, от ложечных механических дозаторов, до сложных автоматических.

## **Выводы к главе 1**

В настоящее время наблюдается отсутствие современных отечественных исследований в области соединения твердых сплавов со сталями методом высокотемпературной пайки. Зарубежные исследования в основном носят прикладной характер и проводятся исключительно с использованием узкого набора промышленных медных и серебряных припоев, разработанных во второй половине 20 века. Так как основной фокус исследования сосредоточен на изучении механических свойств соединений. Никто из авторов рассмотренных работ не рассматривает возможность использования порошковых припоев на основе тройной системы Cu-Mn-Ni, как альтернативу прокату из припоев Cu-Zn. Промышленное использование медно-марганцево-никелевых припоев упоминается лишь в справочниках и каталогах изготовителей припоя, где не дается ответа на вопрос о влиянии химического состава сплавов на механические и эксплуатационные свойства.

Основной целью большинства исследователей является либо улучшение механических и абразивных свойств твердых сплавов, либо изучение механических свойств паяных соединений сталь\твердый сплав. При этом, при изучении процесса пайки твердых сплавов со сталями акцент делается именно на взаимодействие расплава припоя с последней, а область контакта припой\твердый сплав рассматривается вскользь.

Такие результаты не позволяют установить фундаментальных зависимостей механических и эксплуатационных свойств паяных соединений от элементного состава припоев и выявить основные механизмы их формирования.

## **Глава 2 Материалы и методы исследований**

Во второй главе диссертационной работы описаны методы исследований, примененные в ходе проведения экспериментов. Также обоснован выбор материалов и их применение.

### **2.1. Материалы, использованные в работе**

#### **2.1.1. Паяемые материалы**

Для изучения влияния элементного и фазового состава стали на структурно-фазовое состояние паяного соединения в работе применялись две стали принципиально разных классов: феррито-мартенситная сталь 30ХГСА и аустенитная высоколегированная коррозионностойкая 12Х18Н10Т. Сталь 30ХГСА наиболее часто используется при изготовлении державок горного инструмента. Температура закалки этой стали составляет 880-900 °С. Сталь 12Х18Н10Т была выбрана из соображений того, что ее химический и фазовый состав принципиально отличается от 30ХГСА. Предполагалось, что из-за гораздо меньшего содержания железа и большего содержания никеля и хрома, процесс взаимодействия с расплавленным припоем должен был идти иначе, чем в сплавах Fe-C. Также одним из отличий сталей является то, что при отжиге стали 12Х18Н10Т происходит фазовый переход в ферритную область, который устраняется только путем термомеханической обработки (деформирование и закалка).

В исследованиях была выбрана марка твердого сплава ВК8, так как его наиболее часто применяют при изготовлении режущих вставок тангенциальных резцов. Сплав ВК8 обладает сбалансированными характеристиками твердость-трещиностойкость. Имея значения твердости 87,5 НРА по сравнению с твердым сплавом марки ВК3, у которого показатели твердости находятся на уровне 89НРА, ВК8 обладает пределом прочности на изгиб 1569МПа, против 981 МПа у ВК3. Химические составы

материалов согласно ГОСТ 4543-71, ГОСТ 5632-2014 и ГОСТ 3882-74 приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав паяемых материалов [47,95,96].

Марка сплава	Химический состав, мас. %							
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	WC	Co
ВК8	-	-	-	-	-		92	8
12Х18Н10Т	<0,12	<0,8	<2	9-11	17-19	<0,3	-	-
30ХГСА	0,28-0,34	0,9-1,2	0,8-1,1	<0,3	0,8-1,1	<0,3	-	-

### 2.1.2. Припой

#### Выбор составов сплавов

Проанализировав отечественные и зарубежные составы припоев системы Cu-Mn-Ni, приведенные в таблице 1.6 и 1.7 было принято решение взять за основу сплав ВПР2 (сплав №2 в таблице 2.2). Сплав №1 имеет увеличенное содержание никеля по сравнению со сплавом 2. Сплав 3 имеет пониженное до 14 мас.% по сравнению со сплавом 2 содержание марганца. В сплаве 4 произведена полная замена никеля на кобальт, а в сплаве 5 частичная замена по сравнению со сплавом 2.

Таблица 2.2 – Расчетный химический состав экспериментальных сплавов

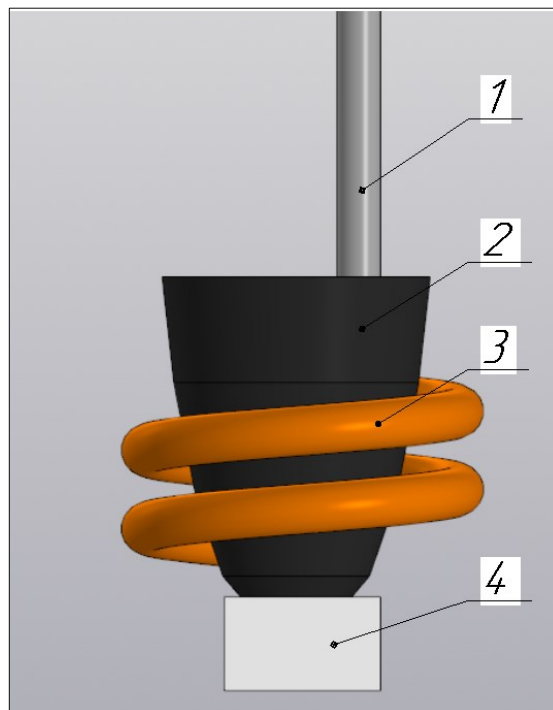
№ сплава, п.п.	Химический состав, мас. %			
	Cu	Mn	Ni	Co
1	Осн.	23,5	9	-
2	Осн.	23,5	5	-
3	Осн.	14,0	5	-
4	Осн.	23,5	-	5
5	Осн.	23,5	3	3

Таким образом, путем исследования паяных соединений, полученных при помощи припоев, приведенных в таблице 2.2 производилась оценка

влияния химического состава припоев на структурно-фазовое состояние и механические характеристики паяных соединений.

### Выплавка сплавов

Выплавку сплавов производили на индукционной установке ВЧУ – 15/66 с кольцевым двухвитковым индуктором. А качестве шихтовых материалов использовались чистые металлы: медь марки М0, марганец марки МН997, никель марки Н0, кобальт марки К0. Шихтовые материалы взвешивали на электронных весах с погрешностью 0,1г, а затем смешивали, перемешивая вручную. Для выплавки в тигель марки АК размером 0,1М (ТУ1590-023-00221209-2009) вводилась шихта, которая закрывалась флюсом – порошкообразным криолитом. Далее производился нагрев тигля и плавление шихтовых материалов. После расплавления шихты расплав перемешивался керамической мешалкой. Плавка производилась в протоке аргона. Газ подавался через ротаметр с потоком 5л/мин. Схема выплавки приведена на рисунке 2.1.



1 – трубка подачи аргона; 2 – тигель; 3 – индуктор; 4 – керамическая подставка

Рисунок 2.1 – Схема выплавки образцов

Охлаждение металла после выплавки производили под аргоном вместе с тиглем. Полученный слиток травили в 10% растворе ортофосфорной кислоты для снятия шлаков, а затем разрезали на фрагменты. Изображение слитка приведено на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Изображение слитка

В таблицах 2.3 и 2.4 представлены данные по химическому анализу и температурным свойствам, полученных экспериментальных сплавов.

Таблица 2.3 – Химический состав экспериментальных сплавов по данным АЭС-ИСП

№ сплава, п.п.	Химический состав, мас. %			
	Cu	Mn	Ni	Co
1	67,63	23,1	9,32	-
2	71,78	22,9	5,09	-
3	80,34	14,8	5	-
4	69	25,57	-	5,38
5	68,8	24,87	3,25	3

Таблица 2.4 – Температурные характеристики экспериментальных сплавов по данным ДТА

№ сплава	T <sub>sol</sub> , °C	T <sub>liq</sub> , °C
1	910	955
2	900	923
3	927	988
4	897	972
5	886	919

### 2.1.3. Флюсы

В качестве флюсов в работе использовалось 2 типа принципиально различающихся составов: 1 полностью состоящий из боратов и 2 – состоящий из боратов с добавкой фторборатов. Активными веществами в флюсах ПВ200 и ФК260 является фторбораты щелочных металлов. Составы флюсов и их температурные характеристики приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Химический состав флюсов, использованных в работе

Марка флюса	Активные вещества	Интервал активности*, °С	
		T <sub>начала</sub>	T <sub>конца</sub>
ФК260	$\text{NaBF}_4 + \text{B}_2\text{O}_3$	750	1100
ПВ200	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{B}_2\text{O}_3 + \text{CaF}_2$	850	1200
ФК250	$\text{KF} + \text{KBF}_4$	550	950

Флюс ФК260 является базовым для пайки сталей и твердосплавного инструмента высокотемпературными припоями. ПВ200 же имеет высокую температуру плавления. Принципиальная разница между ними состоит в силе активности и времени живучести. Флюс ФК260 является самым активным, поэтому его время живучести самое низкое из всех использованных в работе. ПВ200, имея самую высокую температуру, обладает сочетанием качеств, по сравнению с ФК260: среднее время живучести и средняя же сила активности. Флюс ФК 250 является низкотемпературным, предполагалось, что добавление такого флюса в паяльные смеси предотвратит окисление порошка при нагреве.

Флюсовые пасты готовились следующим образом: порошковые компоненты флюсов загружались в атриторную мельницу, затем в смесительную камеру загружалась дистиллированная вода и происходило смешение в течение 4 часов. После смешения, готовая флюсовая паста имела консистенцию жидкой сметаны.

Порошки флюсов, используемые для приготовления паяльных смесей готовились из флюсовой пасты. Для этого флюсовую пасту выпаривали в сушильном шкафу. Выпаривание производилось в емкостях из коррозионно-стойкой стали под вытяжкой по режиму 120 °С 8 часов. Полученную после выпаривания пульпу измельчали в атриторной мельнице в течение 1 часа. Финальным этапом приготовления порошка флюса был просев через сито с крупностью ячеек 160мкм.

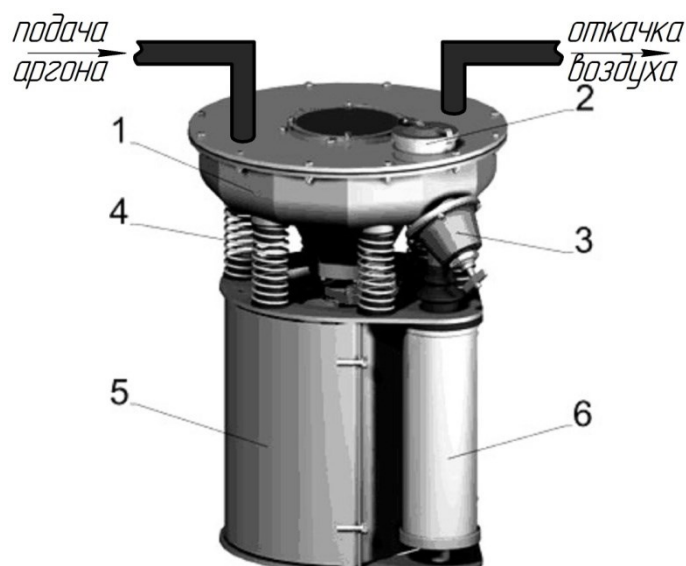
## 2.2. Методика приготовления паяльных смесей

Для изучения влияния количества флюса в паяльной смеси на качество паяных соединений в работе оптимизацию состава паяльной смеси ПС МНМЦ9-23,5. В таблице 2.6 представлены составы паяльных смесей, изученных в работе.

Таблица 2.6 – Составы экспериментальных паяльных смесей

№ п.п.	Количество припоя, мас. %	Количество флюса, мас. %
1	96±1	4±1
2	92±1	8±1
3	90±1	10±1
4	88±1	12±1
5	85±1	15±1
6	83±1	18±1

Приготовление паяльных смесей происходило в атриторной мельнице МВ - 0,005, характеристики которой представлены в таблице 2.7. На рисунке 2.3 изображена схема мельницы.



1 – смесительная камера; 2 – загрузочный патрубок; 3 – разгрузочный клапан;  
4 - пружины; 5 - рама; 6 – стакан для получаемого материала

Рисунок 2.3 – Схематическое изображение атриторной мельницы

Таблица 2.7 - Характеристики атриторной мельницы МВ-0,005

Характеристика	Значение
Вместительность камеры, м <sup>3</sup>	0,005
Объем загружаемого материала, м <sup>3</sup>	0,0015
Мощность, кВт	0,37
Габаритные размеры (ДхШхВ), мм	565х445х440
Масса (без шаров), кг	445
Размольные тела – стальные шары (ШХ15) диаметром 10-15 мм, шт.	440
Масса размольных тел, кг.	18

Для протекания эффективного смешения материалов с разной плотностью и увеличения интенсивности воздействия размольных тел на обрабатываемый материал, соотношение между размольными телами (стальные шары) и измельчаемым материалом должно быть 10:1.

Процесс приготовления паяльных смесей заключался в следующем:



1. в смесительную камеру (рисунок 2.3) засыпалось нужное количество порошка флюса, затем засыпался порошок припоя;
2. откачка воздуха из смесительной камеры при помощи форвакуумного насоса НВР-5Д до остаточного давления 2 кПА;
3. подача технически чистого аргона;
4. пункты 2-3 повторялись три раза для уменьшения количества остаточного кислорода.

Процесс смешения производился в течение 40 минут. Контроль остаточного давления воздуха в смесительной камере производился при помощи электронного вакуумметра.

### **2.3.Методика атомно-эмиссионного химического анализа**

Для определения химического состава экспериментальных сплавов-припоев, выплавленных в работе, применялся спектральный атомно-эмиссионный метод с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП).

АЭС-ИСП является высокочувствительным, многоэлементным, экспрессным методом анализа, позволяющим получать воспроизводимые и точные результаты, что обусловлено использованием безэлектродного высокочастотного индукционного разряда в аргоне в качестве источника возбуждения спектра. Разряд ИСП обладает хорошей временной и пространственной стабильностью, высокой температурой, обеспечивающей эффективную атомизацию и возбуждение поступающего в него анализируемого раствора. Проведение анализа проб из их растворов позволяет, используя растворы государственных стандартных образцов, значительно упростить градуировку спектрометра.

Измерения проводятся на спектрометре iCAP 6300 Radial View фирмы Thermo Fisher Scientific Inc. Преимущество данного прибора (рисунок 2.4) заключается в использовании современной оптической системы (решетки Эшелле) и полупроводникового твердотельного детектора (CID86), что

позволяет одновременно получать и детектировать все спектральные линии определяемых элементов.



Рисунок 2.4 – Спектрометр iCAP 6300 Radial View фирмы Thermo Fisher Scientific Inc.

Основные технические характеристики прибора:

-спектральный диапазон: 166 – 847 нм;

-разрешение 7 пм на длине волны 200 нм;

-твердотельный генератор с частотой 27,12 МГц и мощностью 750–1600 Вт;

Для калибровки прибора использовались стандартные образцы состава раствора ионов Cu, Mn, Ni Co, Fe.

#### **2.4.Методика проведения дифференциально-термического анализа**

Температуру плавления сплавов Cu-Mn-Ni определяли методом дифференциально-термического анализа (ДТА). Метод основан на автоматической записи дифференциальной термопарой термограмм (кривых, показывающих разность температур  $\Delta T$  между исследуемым веществом и эталоном, нагреваемых или охлаждаемых в одинаковых условиях). Так как фазовое превращение сопровождается тепловым эффектом (например, плавление), то это будет фиксироваться на термограммах, благодаря изменению скорости падения или увеличения температуры образца. Эталоном служит вещество, не имеющее фазовых превращений в исследуемом интервале температур.

Для проведения дифференциального термического анализа полученных сплавов использовался термоанализатор NETZSCH STA 449 F1 Jupiter, который позволяет одновременно регистрировать изменения массы образца (термогравиметрический анализ) и процессы, сопровождающиеся выделением или поглощением тепла (дифференциальная сканирующая калориметрия/дифференциальный термический анализ). В таблице 2.8 представлены технические характеристики прибора для проведения ДТА.

Таблица 2.8 – Характеристики прибора NETZSCH STA 449 F1 Jupiter

Характеристика	Значение
Температурный диапазон измерений, °С	-150 - 2000
Скорости нагрева и охлаждения, К/мин	0,001 - 50
Диапазон взвешивания, мг	5000 мг
Атмосферы	инертная, окислительная, восстановительная, статическая, динамическая, вакуум

## 2.5. Измерение краевых углов смачивания

Измерение краевых углов смачивания проводилось на установке ВЕГА-М, схема рабочей камеры которой приведена на рисунке 2.5. Вакуумная камера установки оснащена оптическим вводом, который позволяет наблюдать за происходящим внутри камеры процессом. Танталовый нагреватель имеет трубчатую форму. Перед оптическим вводом, на штатив устанавливается высокоскоростная камера. Камера устанавливается таким образом, чтобы ее объектив и образец находились на одной оси.

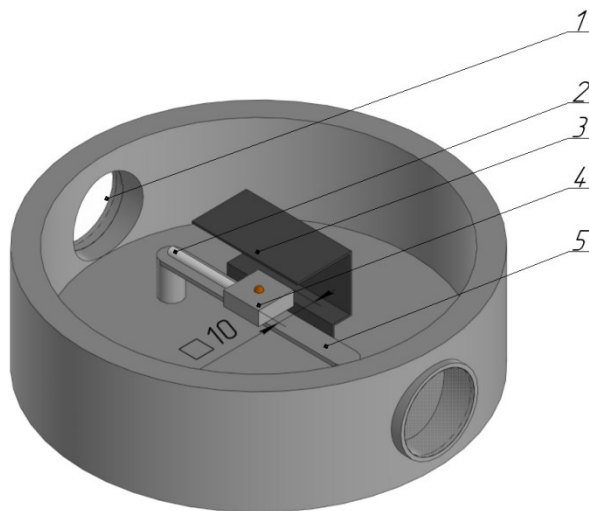
Для проведения испытаний в камере поддерживается вакуум, на уровне  $10^{-5}$  Па при помощи форвакуумного и диффузионного паромасляного насосов. Установка оснащена системой водяного охлаждения.

Приведенная конструкция установки помогает обеспечить следующие параметры при испытаниях согласно [97]:

- горизонтальность испытываемого образца;
- возможность создания необходимой среды или вакуума в период испытаний;
- юстировку и фокусировку четкого изображения капли припоя на экране;
- равномерный нагрев образца до заданной температуры.

Контроль за мощностью нагрева и измерением температуры осуществляется при помощи двухканального ПИД-регулятора температуры с подсоединенной W-Re термопарой.

Непосредственно перед испытанием поверхность образцов и припоев обезжиривали изопропиловым спиртом. Дозировка припоя производилась массово. Припой в количестве 0,05г помещался на подложку из исследуемого материала, которая помещалась на графитовую подставку. Фиксация порошков производилась при помощи органической связкой.



1 – оптический ввод; 2 – термопара ВР; 3 – Та нагреватель; 4 – исследуемый образец; 5 – столик

Рисунок 2.5 – Схема вакуумной камеры установки Вега-М

После достижения нужного уровня вакуума в камере, производился нагрев со скоростью 200 °С/мин при нагреве до 850 °С, и 20 °С/мин при

дальнейшем нагреве. Фотосъемка велась с частотой 1 кадр каждые 10 С, начиная с 850 С, затем образец охлаждался с печью. Обработка полученных изображений проводилась на ПК, в программном комплексе Компас 3д. По полученным данным в программном комплексе Origin pro 8 строилась зависимость краевых углов смачивания от температуры  $\theta(T)$ . Пример изображения, полученного в процессе испытаний представлен на рисунке 2.6.

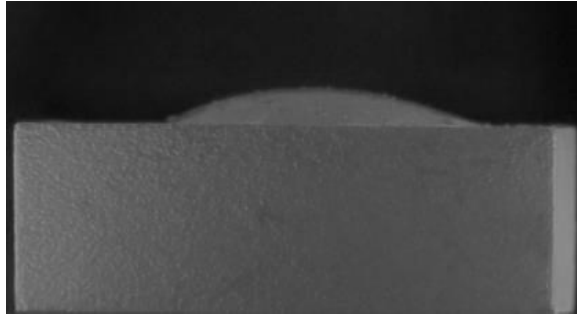


Рисунок 2.6 – Изображение капли растекшегося припоя

## 2.6.Металлографические исследования

Для проведения исследований образцы разрезались пополам вдоль паяного шва на электроэрозионном станке, затем проводилась их заливка в особый проводящий состав Technovit 5000. После этого изготавливались шлифы.

Шлифовка и полировка образцов проводилась на шлифовально-полировальном станке ПОЛИЛАБ П12 следующим образом:

1. Плоское шлифование с водой на алмазных шлифовальных дисках [абразив – монокристаллический алмаз с зернистостью 180, 400, 800, 1500].
2. Доводка на алмазной пасте с абразивной способностью: 40/28 НОМ, 14/10НОМ и 7/5НОМ.
3. Полировка алмазной монокристаллической суспензией с крупностью абразивных частиц 9, 5 и 1 мкм на бархатной ткани.

Металлографические исследования проводились при помощи оптического металлографического микроскопа МЕТАМ РВ-21, представленного на рисунке 2.7. Фотофиксация изображений производилась

при помощи фотообъектива TOUPCAM с последующей передачей снятых изображений на персональный компьютер с программным обеспечением TOUPVIEW.



Рисунок 2.7 – Металлографический микроскоп МЕТАМ РВ-21 [98]

Металлографические исследования структуры зоны взаимодействия и распределение элементов проводили на электронном микроскопе TESCAN VEGA SBH3 с приставкой для микрорентгеновского анализа Oxford Instruments Advanced AZtecEnergy, изображенном на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Растровый электронный микроскоп TESCAN VEGA SBH3 [99]

## **2.7. Механические испытания**

В работе проводились механические испытания на срез, и ударный изгиб.

Механические испытания проводились на разрывной машине Quasar 50 в режимах сжатия и растяжения. Программное обеспечение машины

фиксировало координату платформы вдоль оси  $z$  и прилагаемое усилие при помощи тензодатчика. По полученным данным строилась зависимость  $\tau(x)$  в программе Origin pro 8. На рисунке 2.9 изображен собранный образец в захватах разрывной машины.

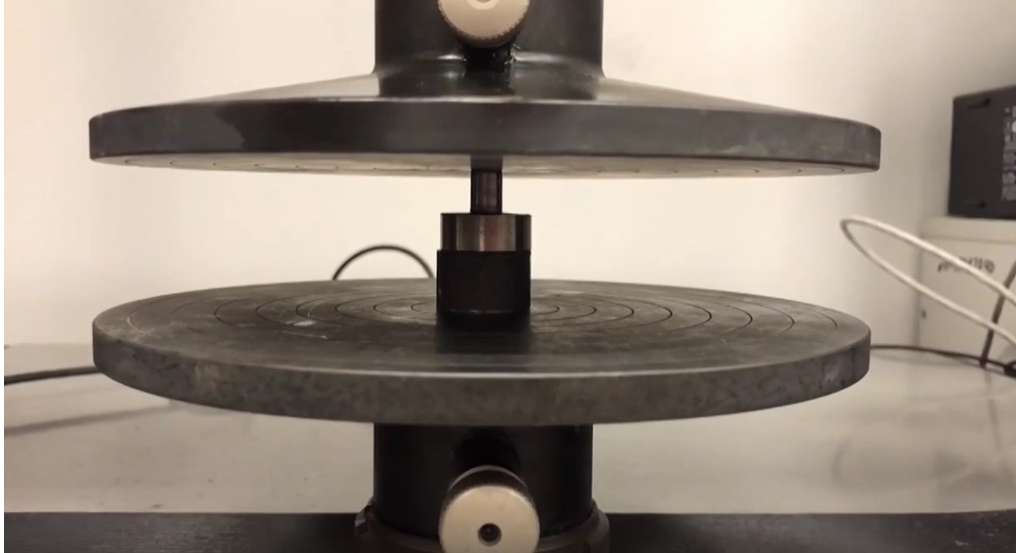


Рисунок 2.9 – Проведение испытания на срез

На рисунке 2.10 представлена типичная диаграмма нагружения, получаемая при испытаниях на срез.

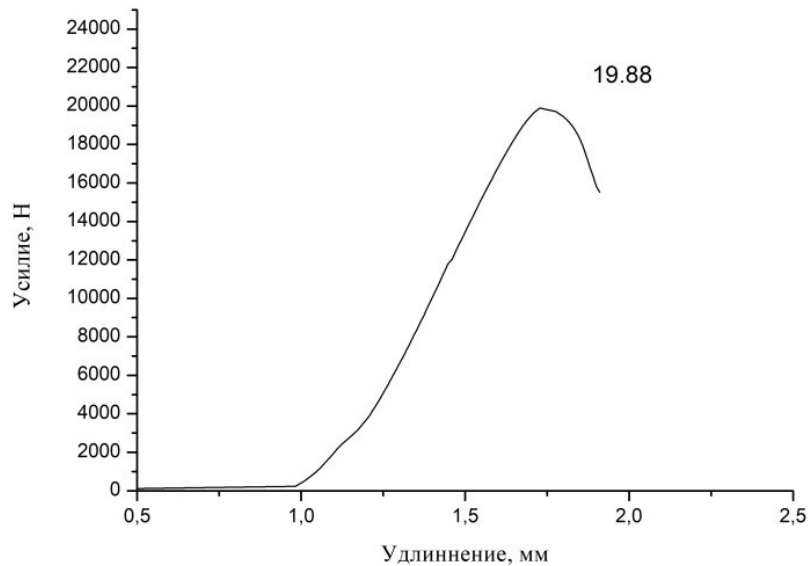


Рисунок 2.10 – Зависимость усилия разрывной машины от координаты захватов

Конструкция образцов и выбор испытаний описаны в экспериментальной части настоящей работы.

## **2.8.Пайка образцов**

Пайку образцов производили в вакуумной горизонтальной печи сопротивления и на индукционной установке ВЧУ - 15/66. Два типа нагрева было выбрано для исследования температурно-временных параметров процесса. Изучение пайки с длительным временем нагрева и выдержки производилось на образцах, паяных в вакуумной печи. Процессы, происходящие при быстрой пайке, изучалась на индукционной установке.

### **2.8.1. Индукционная пайка**

Индукционный нагрев типичен для реального производства. В ходе такого процесса деталь нагревается на воздухе под флюсом, а сама пайка происходит быстро. В связи с тем, что время работы флюса ограничено, индукционный нагрев позволяет осуществлять только процессы быстрой пайки, с временами до 5-10 мин. Поэтому в данной работе индукционный нагрев использовался для осуществления быстрых процессов пайки, с временем нагрева образцов 1-2мин.

В ходе проведения эксперимента использовалось 2 типа индукторов: кольцевой (рисунок 2.11 а) для цилиндрических образцов и прямоугольный (рисунок 2.11 б) для образцов нецилиндрической формы. Параметры оборудования приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Характеристики установки ВЧУ - 15/66

Параметр	Значение
Максимальная мощность, кВт	10 (15кВА)
Частотный диапазон, кГц	10-100
Габариты, мм	350x350x350
Питание	3фазы 380В
Охлаждение	воздух





а)



б)

а) кольцевой; б) прямоугольный

Рисунок 2.11 – Индукторы, изготовленные и использованные в работе.

В таблице 2.10 приведены параметры пайки образцов на индукционной установке. Флюсование производилось при помощи флюсовых паст на водной основе, описанных в главе 2.1.3.

Таблица 2.10 – Параметры индукционной пайки образцов

№, п.п.	Режим нагрева	Время нагрева под пайку, с	Мощность, кВт	Частота, кГц
1	Пайка при температуре 1000 °С	120	2	25
2	Пайка при температуре 1000 °С, закалка в масле 860 С	120	2	25

### 2.8.2. Пайка в вакууме

Пайку в вакууме производили с целью изучения влияния температурно-временных режимов процесса на механические свойства и структурно-фазовое состояние в зоне паяного соединения. В вакуумной печи не происходит окисления металла, поэтому длительность процесса пайки,

поэтому лимитирующих факторов, ограничивающих время нагрева и выдержки нет. Вдобавок к этому, при печной пайке контроль температуры всегда точнее.

В работе использовалась горизонтальная вакуумная печь сопротивления СНВЭ 1.3.1/16, параметры которой приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Характеристики вакуумной печи СНВЭ 1.3.1/16

Параметр	Значение
Мощность, кВт	20
Максимальная температура рабочего пространства, С	1600
Масса садки не более, кг	15
Максимальное разряжение, Па	$6 \cdot 10^{-5}$
Номинальное напряжение питающей сети, В	380/220
Размеры рабочего пространства (ДхШхВ), мм	100х300х100

Для изучения того, как на диффузионные процессы влияют температурно-временные параметры пайки, было выбрано 6 режимов: три температуры пайки начиная с 1000 °С, 1070 °С и 1120 °С; и два времени выдержки: короткое – 5 мин. и длинное – 20 мин. Снижение времени выдержки приводило бы к получению нестабильных результатов, связанных с инерцией печи. В таблице 2.12 приведены параметры режимов высокотемпературной вакуумной пайки, использованные в работе.

Таблица 2.12 – Температурно-временные режимы пайки в вакууме

№, п.п.	Температура нагрева, °С	Скорость нагрева, °С /мин	Время выдержки, мин	Охлаждение
1	1000	20	5	с печью

2	1070	20	5	с печью
3	1120	20	5	с печью
4	1000	20	20	с печью
5	1070	20	20	с печью
6	1120	20	20	с печью

Марганец имеет низкое давление насыщенного пара и склонен к испарению в вакууме. Для предотвращения загрязнения печи, образцы закрывались стальным экраном, на котором в процессе охлаждения происходила конденсация паров марганца. На рисунке 2.12 изображена оснастка для пайки образцов.

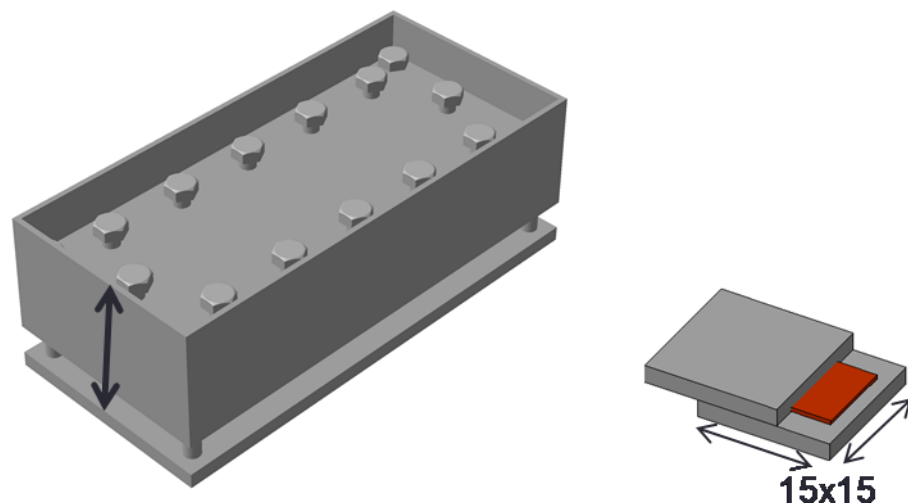


Рисунок 2.12 – Оснастка для вакуумной пайки образцов

При пайке пластинчатых образцов, также изображенных на рисунке 2.12 возможен сдвиг одной пластины относительно другой. Это усугубляется тем, что на пластинчатых образцах зазор выставлялся при помощи проволоки из коррозионностойкой стали толщиной 150 мкм. Поэтому оснастка для пайки была оснащена болтами, которые обеспечивали поджатие одной пластины к другой. Температурное поле контролировалось двумя термопарами типа ВР. Первая термопара являлась управляющей и

располагалось у нагревателя, с ее помощью программатор печи управлял подачей тока на нагреватель. Вторая термопара - контрольная. Данная термопара устанавливалась в непосредственный контакт с оснасткой и производила запись данных для построения графика  $T(\tau)$ .

Во всех экспериментах происходил расчет необходимого количества припоя. Для этого рассчитывался зазор при температуре пайки, исходя из экспериментальной формулы:

$$\Delta C_D = D \Delta T (\alpha_2 - \alpha_1), \quad (1)$$

где  $\Delta C_D$  – зазор при температуре пайки;  $D$ - диаметр паяного шва;  $\Delta T$  – разность температуры пайки и комнатной температуры;  $\alpha_2 - \alpha_1$  - разность ТКЛР твердого сплава и стали. Далее по формуле:

$$m = 1,3n\rho V, \quad (2)$$

где  $m$  – необходимая масса припоя; 1,3 – экспериментальный коэффициент массы припоя, необходимого для формирования галтели;  $n$  – количество галтелей;  $\rho$  – плотность припоя;  $V$  – объем паяного шва, рассчитывалась масса припоя, необходимая для получения полностью заполненного паяного шва.

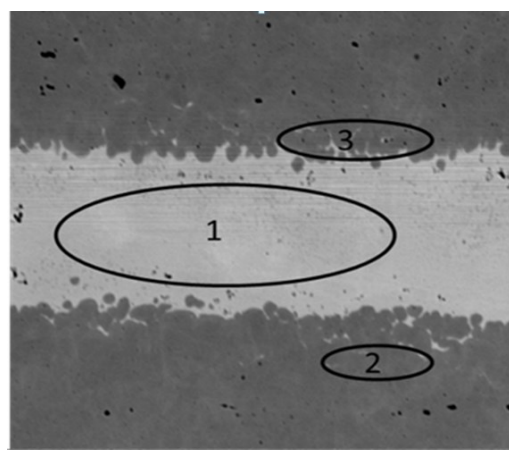
### Глава 3 Исследование физико-химических закономерностей формирования паяных соединений припоями системы Cu-Mn-Ni

В данной главе рассматривались вопросы взаимодействия расплавов припоев системы Cu-Mn-Ni со сталями и твердыми сплавами и выявлялись закономерности формирования структурно-фазового состояния паяных швов, а также способы воздействия на него.

#### 3.1. Исследование закономерностей формирования структурно-фазового состояния паяных соединений, полученных при помощи припоев системы Cu-Mn-Ni

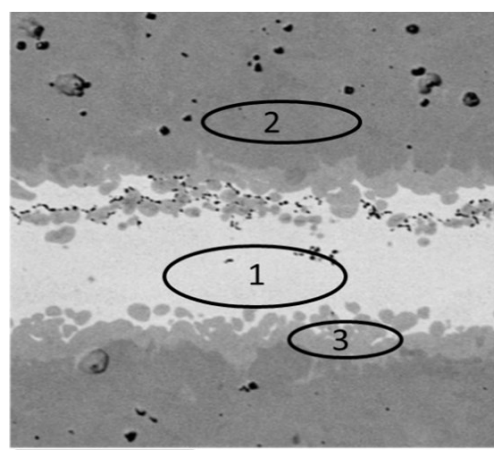
##### *Взаимодействие расплавов со сталями.*

Чтобы выявить ключевую особенность формирования микроструктуры при пайке соединений сталь-твердый сплав, был проведен эксперимент по пайке сталей. На рисунках 3.1 и 3.2 изображены электронные изображения паяных швов выполненных припоем МНМц9-23,5 при температуре 1000 °С с временем выдержки 5 мин, а также при температуре 1120 °С с временем выдержки 20 мин соответственно.



№ спектра	Содержание элемента, мас. %							
	C	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
1				0.85	19.93	3.11	7.89	68.22
2	3.42	0.64	0.51	18.74		66.95	9.73	
3		0.48	0.93	13.76	11.83	54.94	12.94	5.14

а)



№ спектра	Содержание элемента, мас. %						
	C	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
1				19.42	3.67	6.14	70.77
2	3.8	1.27	0.92		94.01		
3		0.86	0.6	19.7	54.49	11.78	12.57

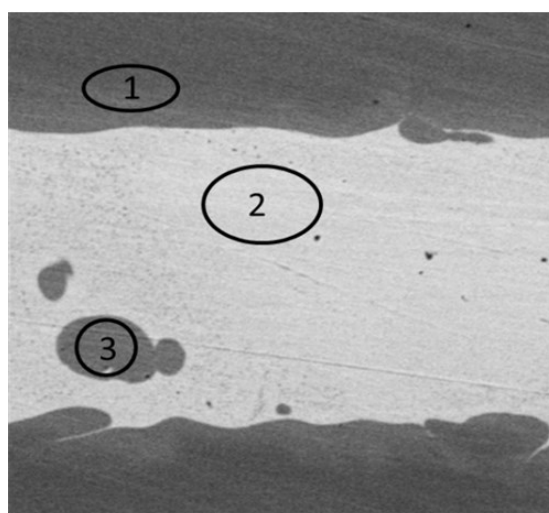
б)

а) сталь 12Х18Н10Т; б) сталь 30ХГСА

Рисунок 3.1 – Микроструктура стальных образцов, паяных припоем МНМц9-23,5 при температуре 1000 °С с временем выдержки 5 мин

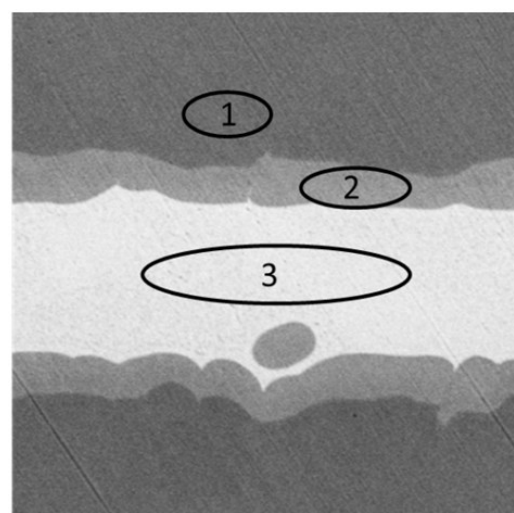
Исходя из микроструктуры образцов, изображенных на рисунках 3.1 и 3.2, можно разделить паяные швы, полученные при помощи припоя Cu-Mn-Ni на две зоны:

- Зона №1 паяного шва, состоящего из твердого раствора Cu(Mn,Ni,Fe). Спектр 1 на рисунке 3.1 а,б, спектр 2 и 3 на рисунке 3.2 а и б соответственно;
- Зона №2 кристаллизации второй фазы, являющейся твердым раствором на основе железа Fe(Mn,Ni,Cu). Спектр 3 на рисунке 3.1 а,б, спектр 3 и 2 на рисунке 3.2 а,б соответственно.



№ спектра	Содержание элементов, мас. %				
	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
1	18.07	8.56	55.29	12.34	5.74
2	4.03	16.4	2.14	7.31	70.12
3	15,56	11.11	51.41	14.35	7.59

а)



№ спектра	Содержание элемента, мас. %						
	C	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
1	2.83	1	0.93	0.86	97.38		
2	3.05	0.62	0.7	8.07	72.58	7.98	7
3	3.21		0.13	15.9	4.44	6.15	70.19

б)

а) сталь 12X18H10T; б) сталь 30ХГСА

Рисунок 3.2 – Микроструктура стальных образцов, паяных припоем МНМц9-23,5 при температуре 1120 °С с временем выдержки 20 мин

Зона кристаллизации паяного шва №1 по химическому и фазовому составу представляет собой припой с растворенными в нем до предела растворимости в твердом состоянии элементами основного материала, в основном это железо. Согласно диаграмме состояния Cu-Fe пределы растворимости железа в меди при 1025, 900, 800 и 700 °С составляют 2,5; 1,5;

0,9 и 0,5 мас. % соответственно. В соответствии с диаграммой состояния сплавов Cu-Ni-Fe легирование меди никелем увеличивает предел растворимости железа, однако эффект не так заметен. Легированные 5 мас. % Ni сплавы, при температуре 900 °C растворяют 3 мас. %  $\alpha$ -Fe, и 4,5 мас. % Fe при добавлении 20 мас. % Ni. Железо с марганцем также имеют широкий интервал твердых растворов, поэтому можно сказать, что марганец также будет увеличивать предел растворимости железа в меди. Согласно данным МРСА на рисунках 3.1 и 3.2 б видно, что с ростом температуры пайки и времени выдержки увеличивается количество растворенного железа в паяном шве, на стали 30ХГСА. В высоколегированной стали 12Х18Н10Т с увеличением температуры пайки с 1000 °C до 1120 °C происходит увеличение концентрации не железа, а хрома. По данным диаграммы состояния сплавов Cu-Cr, медь имеет эвтектику с хромом, образующуюся при 1076,6 °C с концентрацией меди порядка 3 мас. %, однако в паяном шве не обнаружено эвтектических составляющих, весь хром находится в твердых растворах.

### **3.1.1. Изучение физико-химических особенностей взаимодействия расплава припоя с поверхностью WC-Co**

При пайке твердых сплавов со сталями происходят схожие механизмы формирования соединений. На рисунке 3.3 представлено электронное изображение паянного соединения, полученного по режиму 1020 °C с временем выдержки 20 мин. Паяный шов аналогично соединениям сталь\сталь состоит из 2 фаз: фазы на основе медного твердого раствора (спектр 1 на рисунке 3.3) и фазы на основе железа.

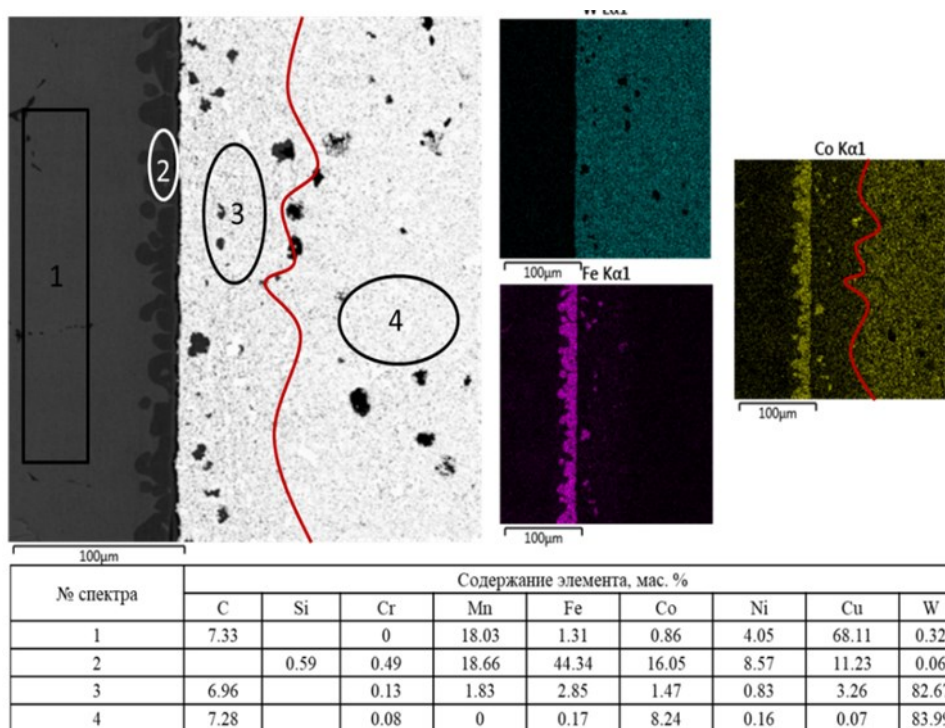


Рисунок 3.3 – Микроструктура образцов 30XГСА/ВК8, паяных в вакууме припоем МНМц5-23,5 при температуре 1020 °С с временем выдержки 20 мин

Двумя обнаруженными в ходе анализа особенностями при формировании соединений сталь\твердый сплав являются:

- Образование зоны диффузионного взаимодействия в твердом сплаве (спектр 3 на рисунке 3.3, граница обозначена красной линией);
- Участие кобальта в формирование второй фазы.

На исследуемых образцах было обнаружено, что при пайке происходит встречная диффузия на границе сталь/твердый сплав: Со из связи в твердом сплаве движется по градиенту концентрации в расплавленный припой, а элементы припоя (Cu, Mn и Ni) заполняют область между частицами WC, обедненную по Со. По данным спектров 3 и 4 на рисунке 3.3 видно, что концентрация Со меняется с 8 до 1,5 мас. %, остальную же часть кобальта в измененной области замещают элементы припоя.

При замене никеля на кобальт в припое, микроструктура паяного шва выглядит так выглядит аналогично микроструктуре, получаемой на припоях



с никелем. Электронное изображение такого паяного шва приведено на рисунке 3.4

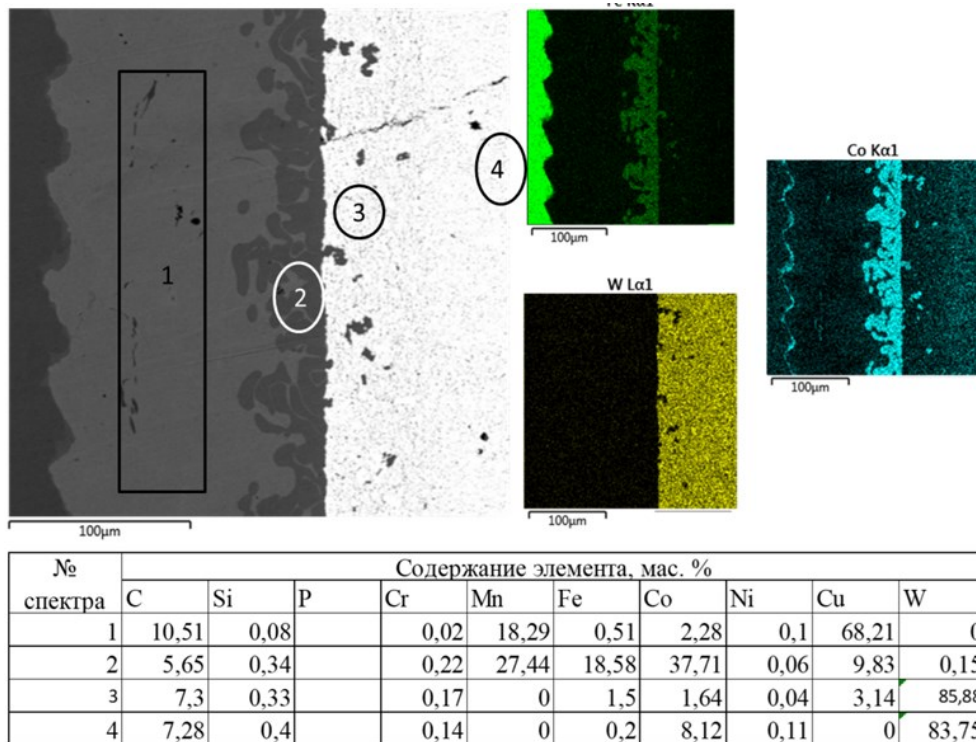


Рисунок 3.4 – Микроструктура образцов 30XГСА/ВК8, паяных в вакууме припоем МКoМц5-25,5 при температуре 1020 °С с временем выдержки 20 мин

Анализируя данные, приведенные на рисунке 3.4 и сравнивая их с данными рисунка 3.3, можно заключить о том, что не происходит глобального изменения тенденций при формировании паяного шва сталь\твердый сплав:

- Не изменяется характер микроструктуры. Паяный шов по-прежнему состоит из 2 зон, состоящих из фаз первичной и вторичной кристаллизации. При этом в обеих фазах никель заменяется на кобальт;
- При легировании припоя кобальтом в твердом сплаве также возникает зона диффузионного взаимодействия, обедненная по кобальту.

При варьировании технологических параметров процесса пайки, изменении паяемой стали, а также изменении состава припоя параметров,

происходит изменение в химическом составе фаз соединения. Фаза, состоящая из медного твёрдого раствора, изменяется при варьировании состава припоя и имеет близкий к нему состав.

Основные изменения в химическом составе происходят в Fe-Co фазе, что можно пронаблюдать при анализе данных из таблицы 3.1.

Таблица 3.1 – Элементный состав второй фазы

№ п.п	Описание образца	Содержание элемента, мас. %					
		Fe	Co	Cu	Ni	Mn	Cr
1	МНМц9-23,5\30ХГСА 1120 °С 20мин	44	22	11	11	12	–
2	МНМц9-23,5\30ХГСА 1000 °С 20мин	46	16	10	10	18	–
3	МНМц9-23,5\12Х18 1120 °С 20мин	44	15	17	20	–	4
4	МНМц9-23,5\12Х18 1000 °С 20мин	42	15	15	22	–	6
5	МКоМц5-25,5\30ХГСА 1120 °С 20мин	42	46	12	–	–	–
6	МКоМц5-25,5\30ХГСА 1000 °С 20мин	40	44	11	–	5	–
7	МКоМц5-25,5\12Х18Н10Т 1120 °С 20мин	25	50	13	–	8	4
8	МКоМц5-25,5\12Х18Н10Т 1000 °С 20мин	35	48	12	–	–	5

Исходя из данных, представленных в таблице 3.1 можно заключить, что решающим фактором является состав припоя. Видно, что при замене никеля в припое на кобальт, увеличивается доля последнего в Fe-Co фазе. При этом важно отметить, что исходя из анализа микроструктур количество второй фазы увеличивается с ростом температуры и времени пайки наряду с изменением в ней концентрации кобальта. При увеличении температуры пайки происходит изменение размера области диффузионного взаимодействия твердого сплава, в которой уменьшено содержание кобальта. Это показано на рисунке 3.5.

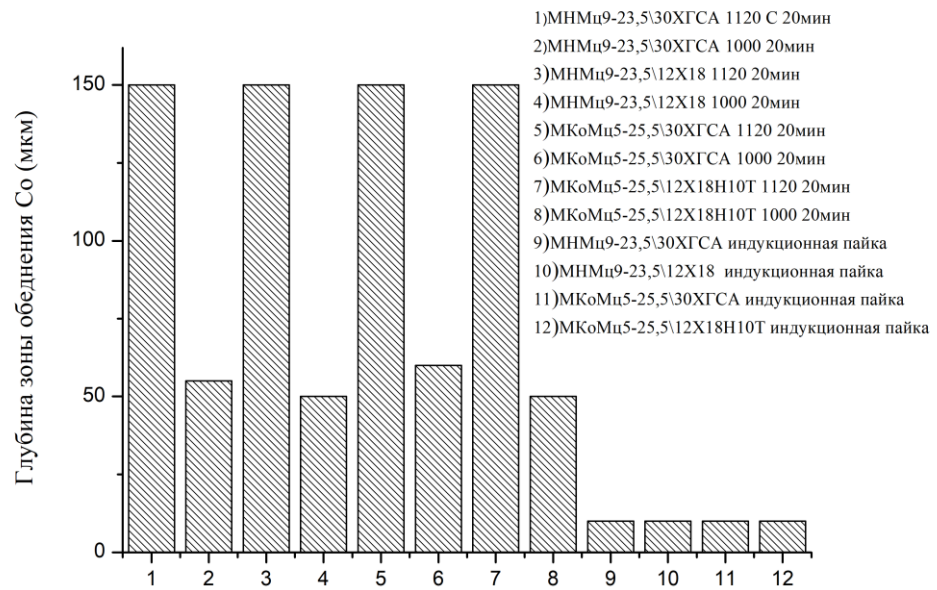
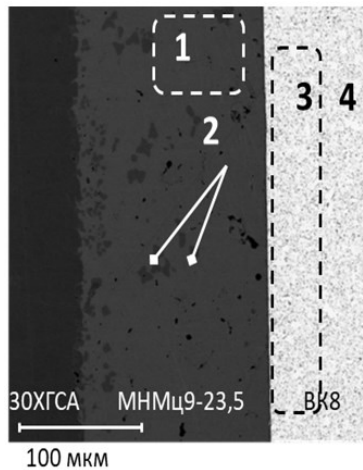


Рисунок 3.5 – Зависимость глубины зоны обеднения твердого сплава по Со при пайке припоями Cu-Mn-Ni и Cu-Mn-Co

Исходя их данных на рисунке 3.5 видно, что температурно-временные параметры процесса непосредственным образом влияют на ширину обедненной зоны по кобальту. Увеличение температуры пайки с 1000 °С до 1020 °С ведет к росту зоны диффузионного взаимодействия твердого сплава с 40-50 мкм до 140-150 мкм.

При пайке индукционным методом время теплового воздействия на образец минимизируется, равно как и минимизируется время нахождения припоя в жидком состоянии. Все это ведет к уменьшению диффузионного взаимодействия между расплавом и контактным к нему твёрдым сплавом. Это снижение характеризуется уменьшением ширины зоны обеднения твердого сплава по кобальту, которое отображено на рисунке 3.5 (образцы 9-12) и снижением общего количества фазы (Fe-Co-Ni-Mn-Cu), что в свою очередь отображено на рисунке 3.6.



№ области	Химический состав
1	64,5Cu-23Mn-9Ni-2Fe-1,5Co
2	49Fe-18Mn-16Co-9Cu-8Ni
3	92WC-3,5Cu-3Co-1,5Ni
4	92WC-8Co

Рисунок 3.6 – Микроструктура соединения 12X18H10T/VK8, паянного индукционным методом

Влияние кинетических параметров на образование паяного соединения заключается в следующем. В условиях вакуумной пайки происходит медленный нагрев и медленное охлаждение соединения. В таких условиях происходит равновесная кристаллизация паяного шва от зон контакта расплава припоя со сталью и твердым сплавом к центру соединения. Рост кристаллов второй фазы происходит эпитаксиально на зернах связки твердого сплава (рисунок 3.4).

В условиях индукционной пайки: быстрого нагрева и быстрого охлаждения образца, кристаллизация паяного шва происходит неравновесно, зерна второй фазы кристаллизуются по всему объему паяного шва. Это явление изображено на рисунке 3.6.

### 3.2. Влияние металлических покрытий нанесенных на твердый сплав на диффузионное взаимодействие с расплавом

В данной главе описан эксперимент по влиянию металлических покрытий на технологические свойства припоя, такие как смачиваемость и растекаемость. Также проводилась оценка влияния покрытий на диффузионное взаимодействие между расплавом припоя и твердым сплавом, а именно на образование и размер зоны диффузионного взаимодействия в твердом сплаве.

В результате проведенных экспериментов были получены зависимости краевого угла смачивания от температуры (рисунок 3.7). Характерные изображения капель для двух температур указаны цифрами.

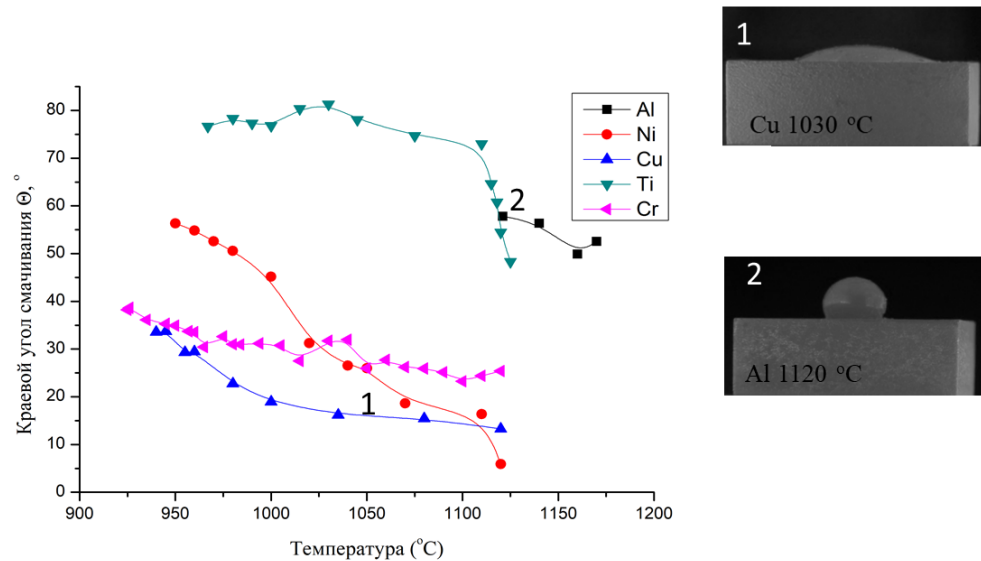


Рисунок 3.7 - Температурная зависимость краевого угла смачивания на образцах с покрытиями

Зависимости имеют убывающий характер с плавным выходом на плато для меди, хрома и алюминия. Для титана и никеля характерна убывающая зависимость с резким изменением краевого угла смачивания в критической температуре.

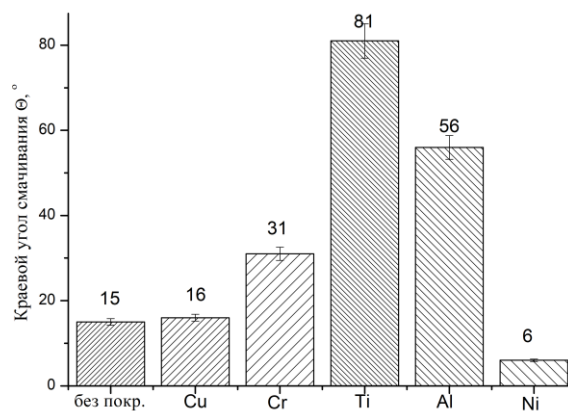


Рисунок 3.8 - Краевой угол смачивания при температуре 1020 °C

Обнаружено, что припой стремится к минимальному углу смачивания с покрытиями Ni, Cu, а также без покрытия (рисунок 3.8). Это объясняется тем, что данные металлы входят в состав припоя, и снижают поверхностную энергию границы расплав-твердое тело, облегчая смачивание и растекание припоя. Минимальный угол смачивания получен на покрытии с Ni и составляет 6 градусов. Без покрытия краевой угол смачивания составляет 15 градусов. На покрытия Al, Cr и Ti для получения угла смачивания меньше 10 градусов нужны высокие температуры, свыше 120 °С .

Таким образом, такие покрытия как Ti и Cr сильно снижают адгезию расплава к подложке в диапазонах температур пайки припоями системы Cu-Mn-Ni, в то время как Ni и Cu увеличивают адгезию способствуя взаимодействию жидкости и твердого тела.

#### *Металлографические исследования.*

Металлографические исследования проводились как на образцах бинарной системы припой-твердосплавная подложка, так и на образцах тройной системы сталь-припой-твердосплавная подложка. Так как в реальном процессе пайки, количество поверхностей основного металла, контактирующего с поверхностью расплава больше, а самого жидкого металла припоя меньше, то такое исследование показывает влияние количества жидкости на диффузионное поведение расплава, его взаимодействие с подложкой и материалом покрытия. Оценка глубины диффузионного взаимодействия проводилась по глубине проникновения меди в твердый сплав при избытке жидкой фазы и недостатке.

#### *Металлографические исследования образцов бинарной системы припой-твердосплавная подложка.*

Изначально все образцы были покрыты сплошной пленкой напыленного металла. Однако, при металлографических исследованиях образцов было выявлено, что в ходе термического процесса все покрытия, за исключением Ti и Cr, растворялись в расплаве припоя (рисунки 3.9,3.10).



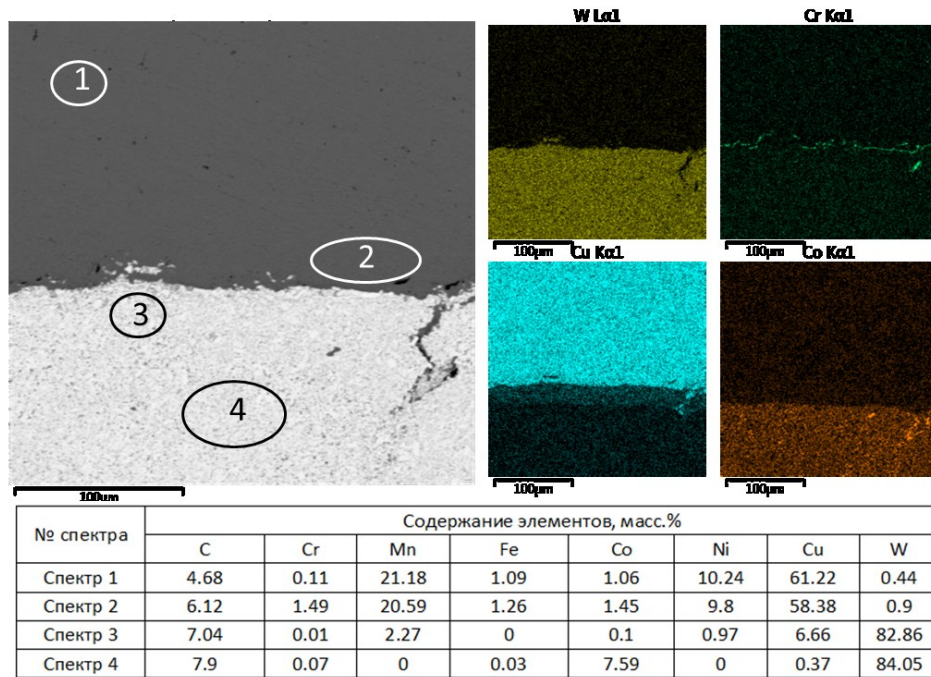


Рисунок 3.9 – Центральная область растекшейся капли на образце с хромовым покрытием нагретом до 960 °С

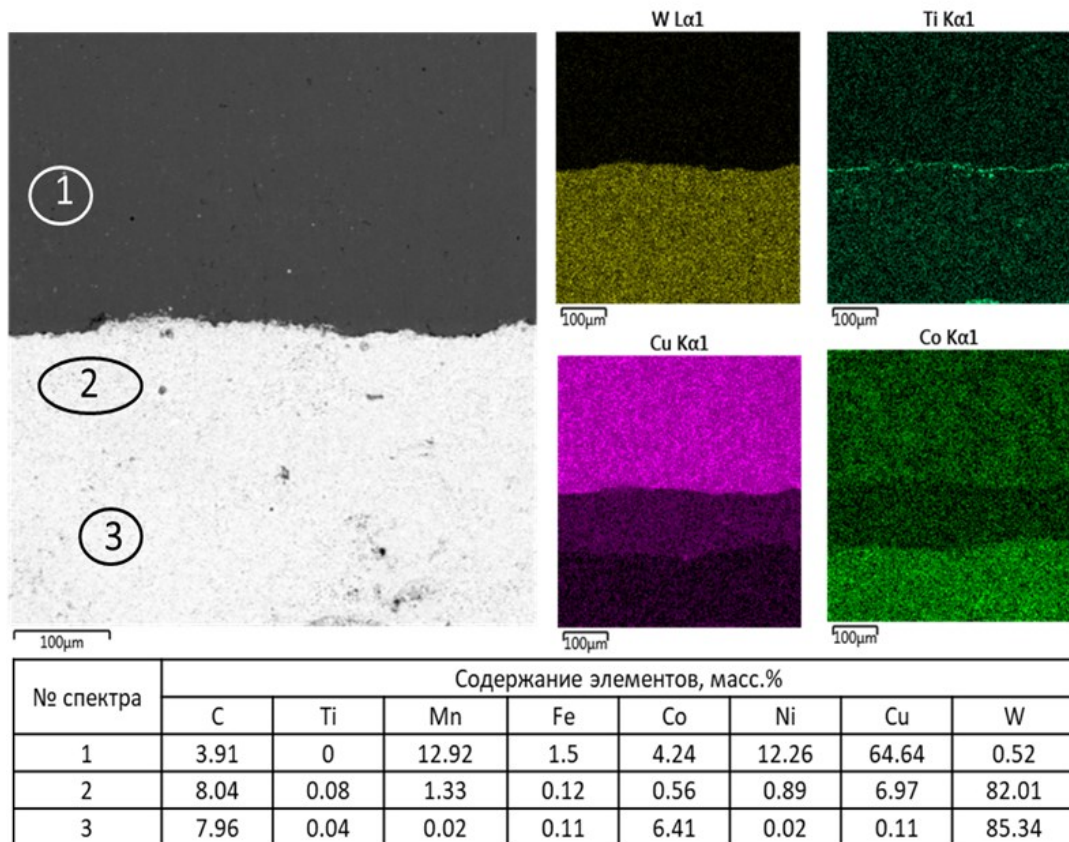


Рисунок 3.10 – Центральная область растекшейся капли на образце титановым покрытием нагретом до 1120 °С

В целом микроструктуру образцов можно разделить на 2 зоны. 1 область – припой (спектр 1 на рисунке 3.9 и спектр 1 на рисунке 3.10). Химический состав этой зоны состоит из твердого раствора на основе меди. В зависимости от температуры нагрева в этой области меняется содержание кобальта, растворяемого из связующего твердого сплава и марганца, испаряющегося в вакууме за счет низкого давления насыщенного пара[101]. 2 область – диффузионная зона (спектр 3 на рисунке 3.9 и спектр 2 на рисунке 3.10). Согласно данным ЭДС, химический состав здесь кардинально отличается от изначального и происходит практически полная замена связующего из твердого сплава на компоненты припоя. Спектр 4 на рисунке 3.9 и спектр 3 на рисунке 3.10 соответствуют по химическому составу твердому сплаву ВК8.

В тоже время стоит отметить, что при отсутствии в зоне контакта с расплавом источника железа (сталь), при взаимодействии расплава с твердым сплавом, кобальт растворяется в твердом растворе меди, а образования второй фазы на основе Fe(Co) не происходит.

Рисунок 3.11 иллюстрирует влияние температуры нагрева и материала покрытия на диффузионное поведение расплава.

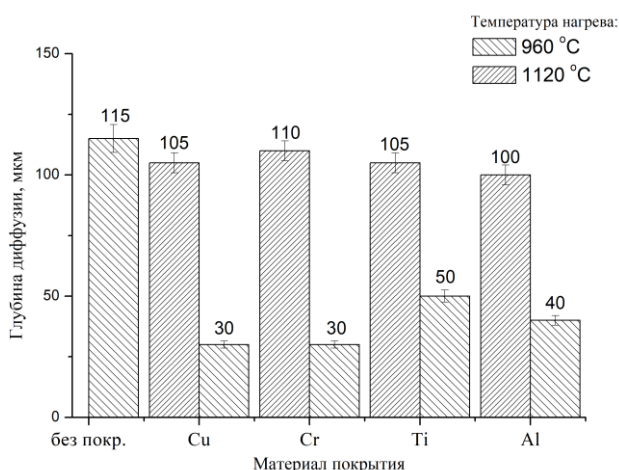


Рисунок 3.11 – Зависимость глубины диффузионного взаимодействия расплава припоя МНМц 9-23,5 от материала покрытия твердого сплава и температуры нагрева на бинарных образцах



Исследования микроструктуры контактной зоны твердый сплав - припой на бинарных образцах (с большим количеством жидкости) показали значительную диффузию элементов припоя и твердого сплава. Влияние тонкопленочного покрытия не величину диффузионного взаимодействия обнаружено не было. Во всех случаях наблюдалась диффузия кобальта из твердого сплава в жидкий припой (рисунок 3.11). При этом минимальная концентрация кобальта наблюдалась в приповерхностной зоне величиной 100 мкм для температуры 1020 °С и 40 мкм для температуры 960 °С. Далее в глубину твердого сплава концентрация кобальта возрастала до нормальных значений (спектры 2,3 на рисунке 3.10). Также концентрация кобальта возрастала и в объеме капли расплава припоя. Было обнаружено, что даже не растворившиеся в расплаве покрытия не работают в качестве диффузионного барьера.

*Металлографические исследования образцов тройной системы сталь-припой-твердосплавная подложка*

В процессе пайки в контактной области с твердосплавной подложкой находится меньшее количество расплава вследствие того, что в паяльный зазор может поместиться строго определенное количество жидкости, которое по объему сильно меньше, чем при свободном растекании капли припоя по подложке. Вдобавок, диффузионная активность жидкого припоя тратится как на растворение стального корпуса образца, так и на растворение кобальта из твердого сплава. На рисунке 3.12 изображена диаграмма зависимости глубины диффузии элементов припоя от материала покрытия при температуре 1020 °С и выдержке 10 мин.

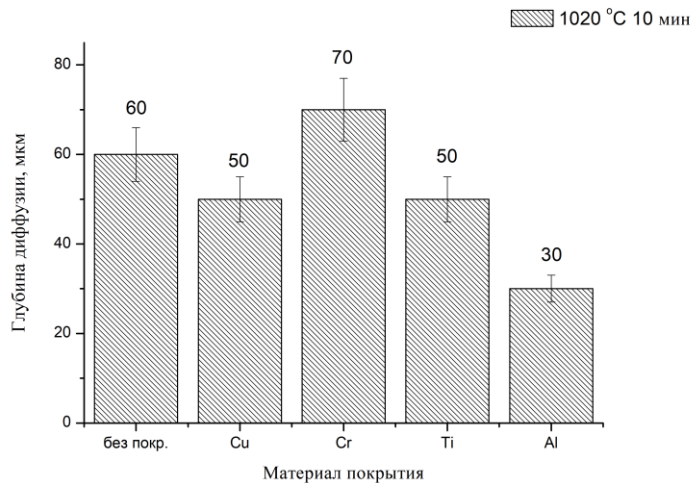


Рисунок 3.12 – Зависимость глубины диффузионного взаимодействия расплава припоя МНМц 9-23,5 от материала покрытия твердого сплава при температуре 1020 °С и времени выдержки 10 мин

По данным с рисунка 8 можно сделать такой же вывод, как и в 3.1: покрытия практически не влияют на диффузию элементов в твердый сплав и растворение из него кобальта. Однако сравнивая данные с рисунка 3.11 и 3.12 можно сделать вывод о том, что при уменьшении объема расплава в паяном шве будет снижаться и его диффузионная активность. Это происходит из-за того, что растворяя элементы подложки жидкий припой увеличивает свою температуру плавления.

### Выводы к главе 3

1. Выявлено, что при соединении твердых сплавов со сталями при помощи медно-марганцевых припоев легированных Ni и Co микроструктура паяного шва имеет двухфазный вид: низкотемпературная фаза, имеющая химический состав, близкий к припою; высокотемпературная фаза, образующаяся в результате растворения Fe и Co из стали и твердого сплава соответственно.
2. Обнаружено, что количество второй фазы зависит от температурно-временных параметров процесса пайки, с увеличением времени выдержки и температуры пайки растет количество второй фазы в

соединении. Распределение второй фазы в паяном шве зависит от условий кристаллизации последнего: в условиях медленного охлаждения и равновесной кристаллизации вторая фаза растет от зерен Co связки твердого сплава к центру соединения; при быстром охлаждении и неравновесной кристаллизации, затвердевание второй фазы происходит по всему объему паяного шва.

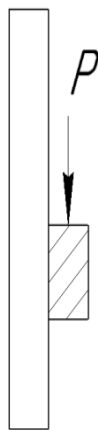
3. Установлено, что температурные зависимости краевых углов смачивания имеют убывающий характер с плавным выходом на плато для Ni и Cu. Без покрытия краевой угол смачивания составляет  $15^\circ$ . Минимальный угол смачивания получен на Ni покрытии и составляет  $6^\circ$ . На покрытия Al, Cr и Ti для получения угла смачивания меньше  $10^\circ$  нужны высокие температуры, свыше  $1200^\circ\text{C}$ .
4. Обнаружено, что толщина зоны обеднения по Co в твердом сплаве зависит от температуры и не зависит от материала покрытия и количества жидкости, взаимодействующей с подложкой. Глубина диффузии меди в твердый сплав составляет в среднем  $100\pm 5\text{ мкм}$  для температуры нагрева  $1120^\circ\text{C}$  и  $50\pm 2\text{ мкм}$  для температуры  $960^\circ\text{C}$ . На ту же глубину происходит обеднение граничной зоны твердого сплава по Co и его замена на компоненты припоя.
5. Основная роль тонких металлических покрытий состоит в изменении поверхностного натяжения расплава припоя при контакте с покрытием. Поэтому, применение покрытий из металлов, входящих в состав припоя улучшают технологические свойства процесса путем повышения адгезии припоя к твердому сплаву.

## Глава 4 Исследование механических свойств паяных соединений сталь/твердый сплав

### 4.1. Выбор метода испытания

Выбор методики испытания является очень важным аспектом при изучении структуры и свойств паяных соединений. Механические испытания должны отражать напряженное состояние, в котором находится изделие в момент эксплуатации и показывать релевантные и стабильные значения.

Конструкция и схема работы тангенциальных резцов, описанные в главе 1.1 говорят о том, что данные резцы работают в условиях тангенциальных напряжений и ударных нагрузок. При испытании соединений сталь/твердый сплав возникает типичная проблема получения адекватных результатов по пределам прочности разнородных соединений. Данная проблема возникает из-за разности механических свойств стали и твердого сплава, точнее из-за разности относительного удлинения. Твердый сплав не может сопротивляться растягивающим нагрузкам как сталь и растрескивается. Данные, полученные при испытаниях, в которых произошло растрескивание твердого сплава, будут необъективными для прочности паяных швов, ввиду того, что получаемыми значениями пределов прочности будут значения для одноосного или косоугольного растяжения твердого сплава. Примером таких испытаний служат испытания, изображенные на рисунке 4.1.

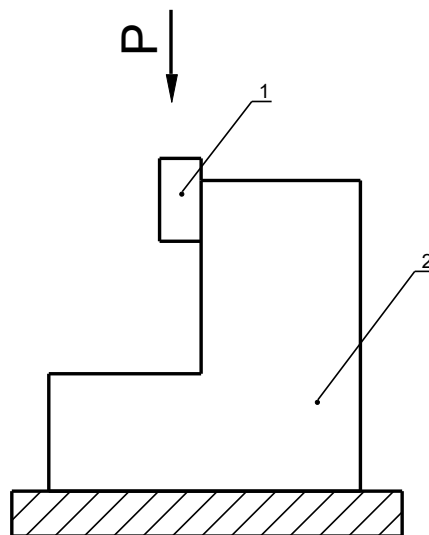


№ образца	Прочность на срез, $\tau_{ср}$ , МПа	Стандартное отклонение, МПа
1	224	76
2	390	
3	296	
4	237	

Рисунок 4.1 - Пластинчатый образец для испытаний на срез согласно [41] и данные, полученные в ходе эксперимента

В данном случае на пластину из стали напаивался цилиндр из твердого сплава. Схема испытаний выглядела следующим образом: пластину вставляли в специальную оснастку повторяющую форму образцы, с U-образным вырезом- упором для твердосплавного цилиндра, нагрузку прикладывали к верхней части стальной подложки. Образец имел люфт в оснастке порядка 10-50 мкм, гарантированный точностью фрезерования. Возникающий люфт приводил к нестабильности испытаний: при возникновении малейшей доли изгибающих напряжений трещина зарождалась в твердом сплаве и полученные значения были нерелевантными. Это можно увидеть на рисунке 4.1, стандартное отклонение составляло 75 МПа, а разброс между высшим и низшим значением достигал 57%.

Другим типом образцов является Г-образная пластина из стали, на которую напаивается параллелепипед из твердого сплава. Изображение такого типа образца приведено на рисунке 4.2



1 – стальной корпус; 2 – твердосплавная пластина; P –направление приложения нагрузки

Рисунок 4.2 - Схема испытания образца на срез согласно [33]

Конструкция, изображенная на рисунке 4.2 имеет все те же минусы, что и изображенная на рисунке 4.1. При малейшей несоосности приложения

нагрузки результаты получаются нерелевантными, что и демонстрирует таблица 4.1

Таблица 4.1 – Экспериментальные данные прочности на срез паяных образцов различными припоями.

№ п.п	Марка припоя	Предел прочности на срез, $\tau_{ср}$ , МПа
1.1	ЛОК59-1-0,3 (пруток Ø2мм)	170
1.2	ЛОК59-1-0,3 (пруток Ø2мм)	183
2.1	Алармет 211 (пруток Ø1,5мм)	131
2.2	Алармет 211 (пруток Ø1,5мм)	39
3.1	Серебро Ag20 (лента)	132
3.3	Серебро Ag20 (лента)	274
4.1	ЛНМц 60-9-5 (лента)	226
4.2	ЛНМц 60-9-5 (лента)	194
5.1	ЛНМц 49-9-0,2 (лента)	217
5.2	ЛНМц 49-9-0,2 (лента)	136

Разница между значениями для одной точки испытания довольно велика, что не позволяет применять данный метод для оценки численных значений.

Стандартные испытания на срез регламентируются ГОСТ 28830-90, конструкция образца представлена на рисунке 4.3. Проблемой в проведении испытания по ГОСТ является изготовление твердосплавной части образца.

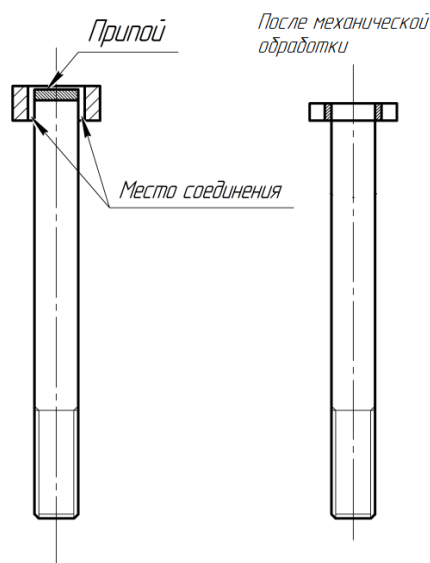
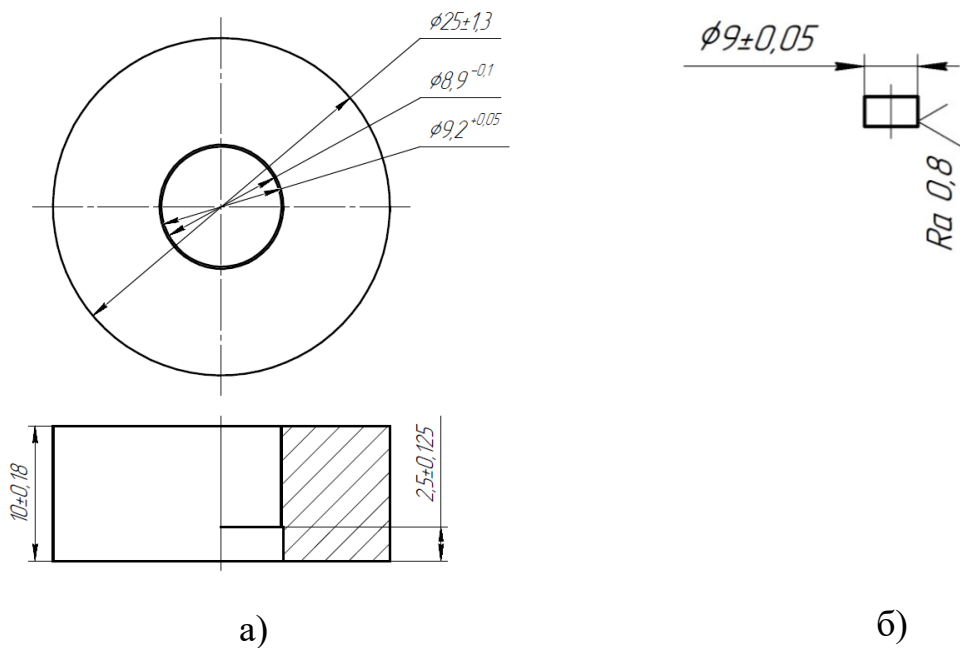
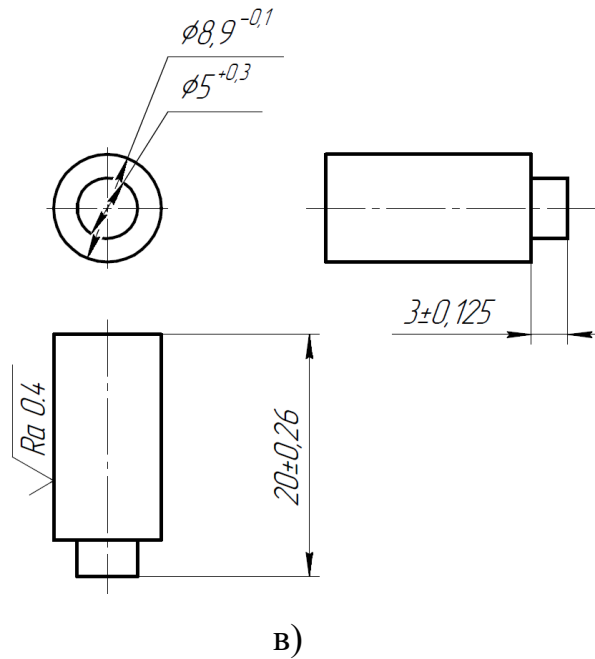


Рисунок 4.3 - Образец для испытаний на срез по ГОСТ 28830-90

На реальных изделиях твердосплавная вставка находится внутри стального корпуса, и из-за разницы ТКЛР после пайки подвергается сжимающим напряжениям. На образцах, выполненных по ГОСТ, при условии того, что твердый сплав будет иметь кольцевую форму, с впаянным в него стержнем из стали, будут возникать растягивающие напряжения. Изготавливать же стержень с резьбой из твердого сплава и спаивать на него стальное кольцо экономически невыгодно.

Идеальным образцом для испытаний является реальный паяный резец, прошедший механическую обработку, о чем и говорит ГОСТ Р 51047-97. Однако изготовление такого образца будет очень металлоемким и накладным с экономической точки зрения. Такие образцы, как и сказано в ГОСТ подходят для оценки механических характеристик при пайке партий резцов в промышленных масштабах. Проанализировав уже имеющиеся конструкции образцов, для исследования механической прочности на срез был разработан новый образец, сочетающий все преимущества рассмотренных методик испытания. Конструкция этого образца изображена на рисунке 4.4





а) стальной корпус; б) твердосплавная вставка; в) пуансон

Рисунок 4.4 – Конструкция образца для проведения испытаний на срез  
Технологический зазор при проектировании составлял от 50мкм до 150мкм на сторону, однако ввиду применения ЧПУ обработки удалось добиться 150мкм на сторону. На рисунке 4.5 изображена схема испытаний.

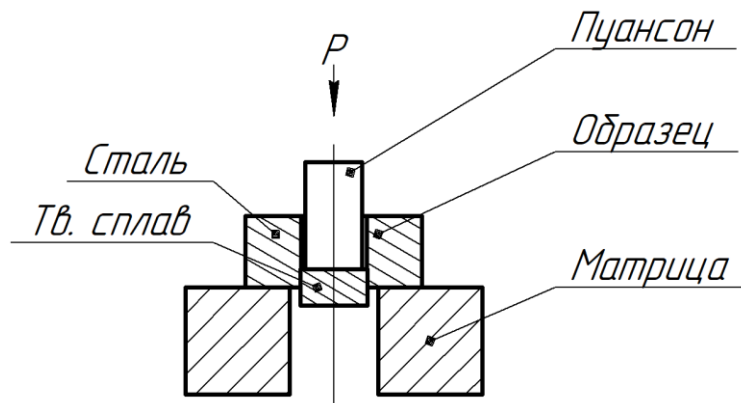


Рисунок 4.5 – Схема испытаний на срез

Для предотвращения среза галтели применялся пуансон с формой изображенной на рисунке 3.4 в.

#### 4.2. Влияние металлических покрытий на характер разрушения образцов

Паяные соединения, как и другие, например, сварные или болтовые, являются концентраторами напряжений в конструкции. Условия



эксплуатации большинства паяных швов предполагают сдвиговые нагрузки. Поэтому в работе оценивалось влияние микроструктуры контактной области твердый сплав\припой на механическую прочность соединения на срез и характер его разрушения в зависимости от металла покрытия.

На рисунке 4.6 представлены электронные изображения разрушенных образцов.

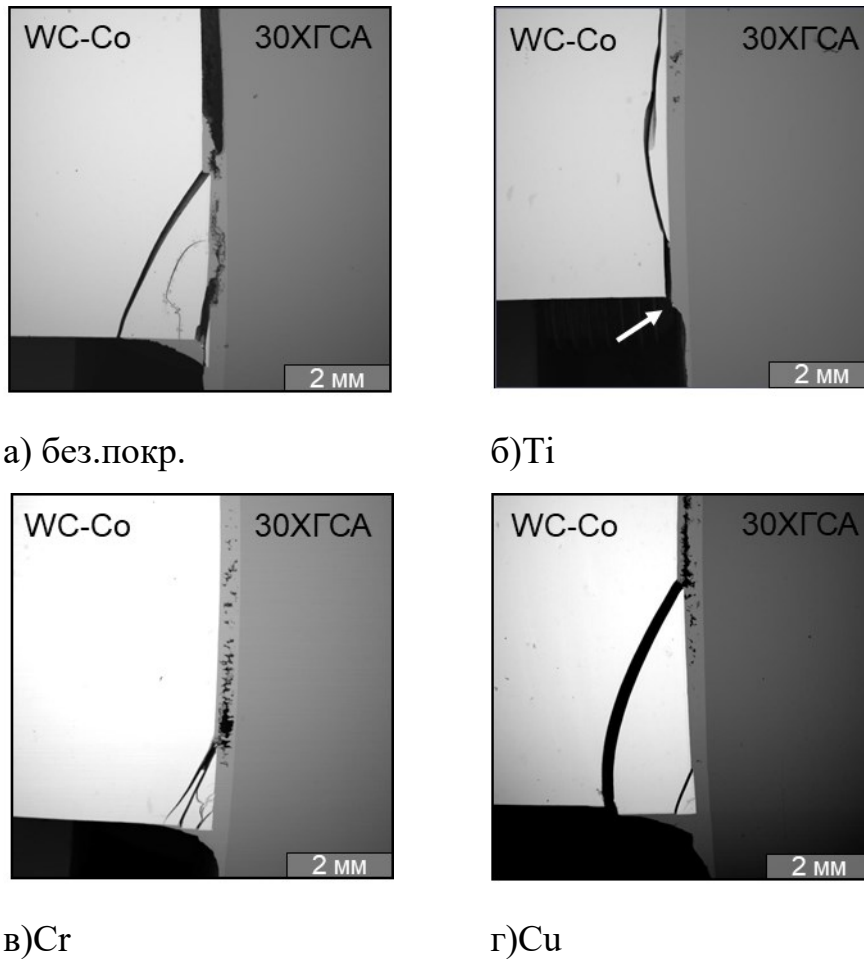


Рисунок 4.6 – Электронные изображения паяных образцов после испытания на срез

Полученные численные значения пределов прочности при испытаниях на срез дали нерелевантные значения. Результаты испытаний приведены в таблице 4.2. Такие значения связаны с особенностью методики испытания на срез. Если посмотреть на рисунок 4.6 а,г, то в галтельной части можно отчетливо увидеть след от оснастки. Оснастка надавливала на галтель, изменяя картину распределения напряжений в паяном шве при испытаниях.

Таблица 4.2 – Результаты испытаний на срез.

Материал покрытия	Прочность на срез, МПа
Без покрытия	224±22
Cu	390±40
Ti	296±29
Cr	237±24

В связи с этим более интересным результатом является характер разрушения образцов. Как было отмечено в работе [78] при соединении со сталями на границе припой\твердый сплав могут образоваться карбиды металлов отличные от WC. Характер разрушения образца с титановым покрытием (рисунок 4.6 б) говорит о том, что скорее всего в приграничной области образовался карбид  $Ti_xC_y$ . Об этом свидетельствует не характерное для других образцов из этой серии «отслоение» припоя от WC-Co. Трещины на всех образцах зарождались в области выше галтели, а затем проникали вглубь материала.

#### **4.3. Влияние образования зоны диффузионного изменения в твердом сплаве на характер разрушения паяных образцов**

Как было отмечено выше, при пайке твердых сплавов со сталями медно-марганцевыми припоями, легированными никелем и кобальтом, со стороны контакта твердого сплава с расплавом припоя образуется область с измененным химическим составом. В этой области сильно снижается концентрация кобальта, который частично или полностью заменяется на элементы, входящие в состав припоя. Размер этой области зависит от температурно-временных параметров процесса. Повлиять на диффузионное взаимодействие между припоем и твердым сплавом не удастся изменением состава припоя, путем легирования его кобальтом и уменьшения за счет этого градиента концентрации, направленного из твердого сплава в припой.

Нанесение покрытий также не дает эффекта, ввиду температурных параметров процесса: активный припой, содержащий марганец реагирует практически со всеми элементами, растворяя их и нарушая сплошность покрытия.

Изображение разрушенного образца представлено на рисунке 4.7. На рисунке представлен образец, паяный в вакууме при температуре 1120 °С с временем выдержки 20 мин. На микроструктуре видно, что кристаллы второй фазы доходят практически до середины паяного шва, а из данных рисунка 3.5 видно, что размер зоны обеднения по кобальту в твердом сплаве составляет 120 мкм.

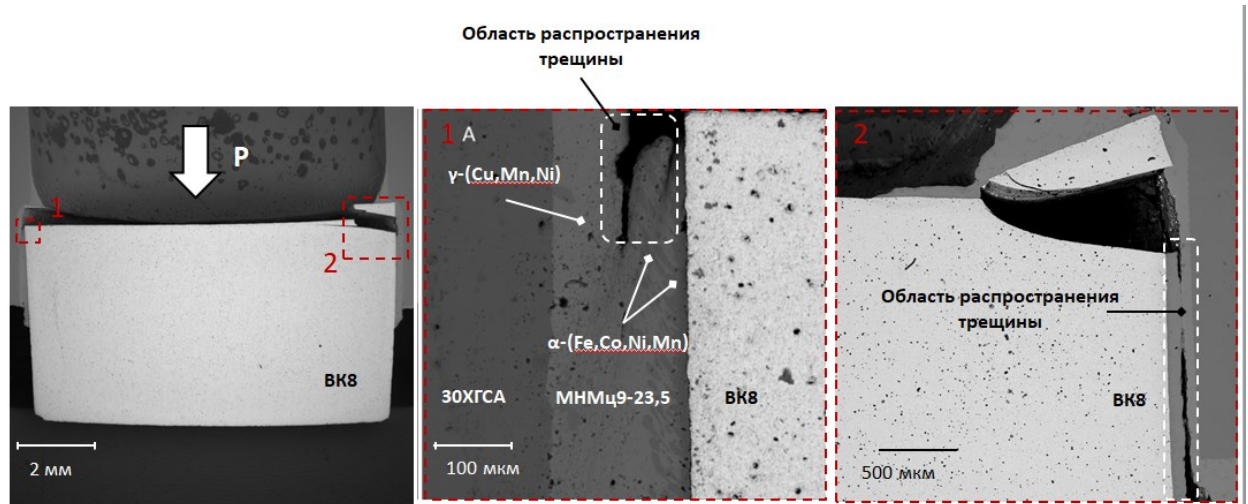


Рисунок 4.7 – Изображение разрушенного образца

30ХГСА/72Cu22Mn5Ni/ВК8, паяного по режиму 1120 °С выдержка 20 мин

Разрушение образца с рисунка 3.32 являлось типичным для всей серии испытанных образцов и отражает общий характер. Трещина зарождалась в твердом сплаве возле галтельного участка паяного шва. В этом месте на образец при приложении нагрузки действовали растягивающие напряжения. Однако, при увеличении нагрузки, трещина не распространялась ни по твердому сплаву, ни по второй фазе. Рост трещины и разрушение паяного шва происходило по центру соединения, являющемуся твердым раствором на основе меди. Это иллюстрируется фрагментом А на рисунке 4.7, на котором отчетливо выражена деформация сдвига галтельного участка относительно центра соединения.

В тоже время, для подтверждения факта того, что зона диффузионного изменения и кристаллиты второй фазы не являются ослабленными зонами в паяном соединении, проводили испытание на трехточечный изгиб. Результаты испытания приведены в таблице 4.3. Разрушение образцов также проходило по паяному шву.

Таблица 4.3 – Предел прочности на изгиб образцов 30ХГСА/ВК8, паяных индукционным методом

№п.п	Марка припоя	Диаметр образца, мм	Максимальная нагрузка, Н	Предел прочности, МПа
1	72Cu22Mn5Ni	5,5	2299	1170±50
2	72Cu22Mn5Co	5,5	3330	1440±62

#### 4.4. Влияние состава припоя, а также температуры процесса пайки на предел прочности при испытаниях на срез

Влияние состава припоя на предел прочности при испытаниях на срез можно оценить по данным, изображенным на рисунках 4.8-4.10..

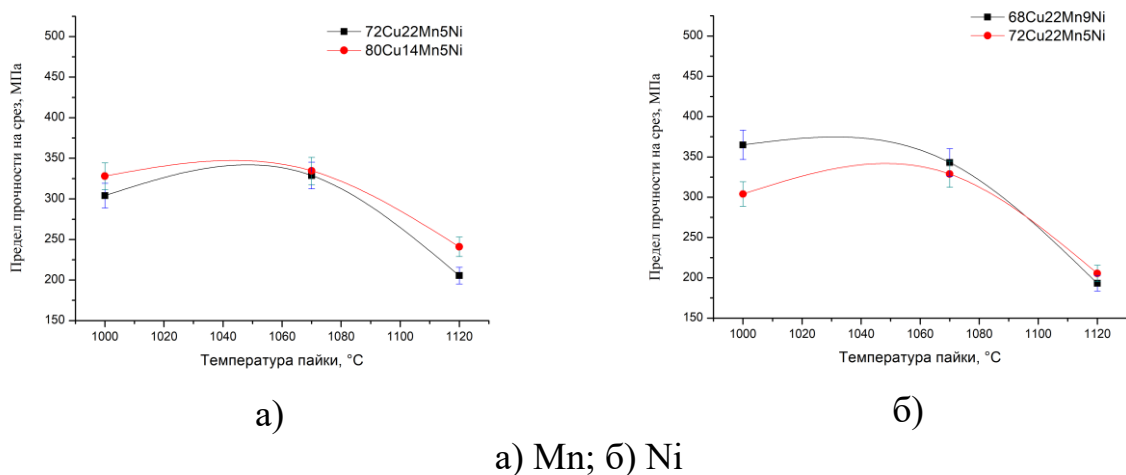


Рисунок 4.8 – Влияние легирующих элементов в припое на предел прочности при испытаниях на срез соединений 12Х18Н10Т/ВК8 в зависимости от температуры пайки

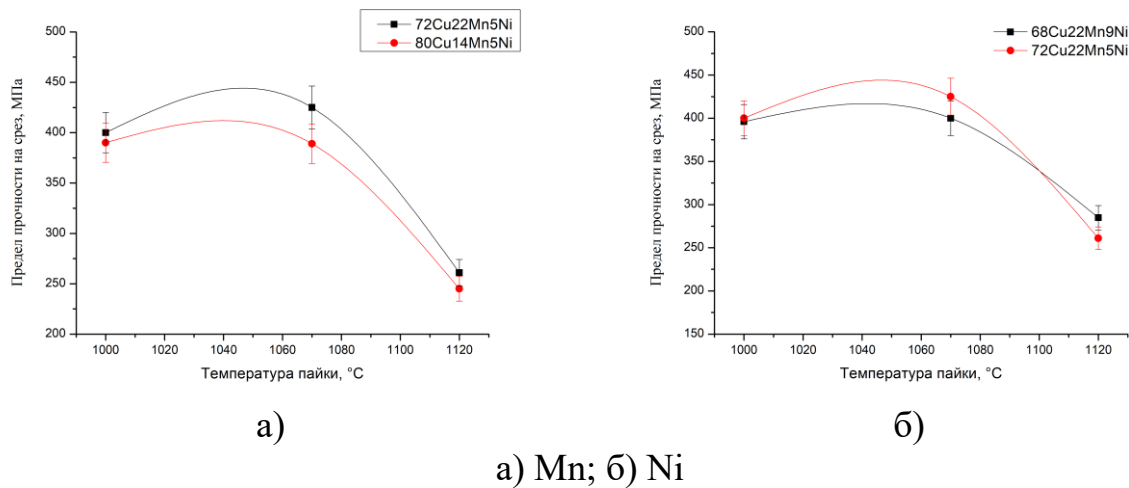


Рисунок 4.9 – Влияние легирующих элементов в припое на предел прочности при испытаниях на срез соединений 30XГСА/ВК8 в зависимости от температуры пайки

Исходя из данных, изображённых на рисунках можно сделать вывод о том, что изменение концентраций в пределах 10 мас. % не вносит сильного изменения в предел прочности. Значения находятся в пределах доверительного интервала. Легируя же сплавы Co происходит упрочнение паяного шва, что отражает рисунок 4.10. По данным рисунка видно, что уже при частичной замене никеля на кобальт происходит упрочнение паяного шва.

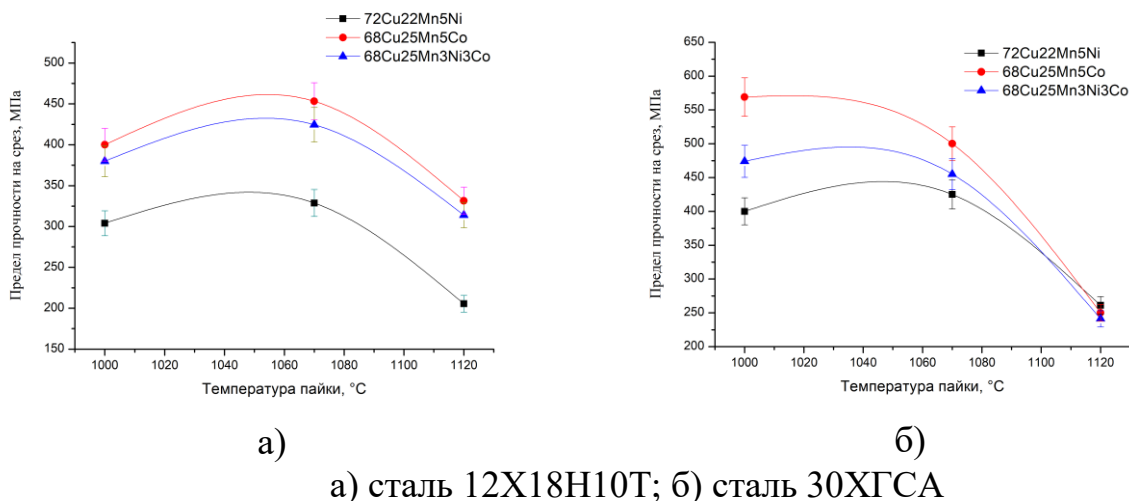


Рисунок 4.10 – Влияние кобальта на предел прочности при испытаниях на срез в зависимости от температуры пайки

Исходя из графиков, изображенных на рисунках 4.8-4.10 наибольшее влияние на механические характеристики вносит температурные параметры

процесса. На деградацию предела прочности при увеличении температуры пайки влияют 3 фактора:

- Увеличение температуры пайки ведет к увеличению остаточных паяльных напряжений после охлаждения образцов;
- При росте температуры пайки согласно рисунку 3.7 уменьшается краевой угол смачивания припоем паяемого материала. Падение краевого угла смачивания означает рост жидкотекучести расплавленного припоя, однако при росте жидкотекучести, уменьшается и радиус образованной при пайке галтели. Галтель сама по себе является концентратором напряжений в соединении, уменьшение же объема металла в галтели приводит к росту напряжений, распределяемых по паяному шву, что в свою очередь приводит к уменьшению размера необходимой для разрушения соединения нагрузки.
- С ростом температуры пайки происходит изменение химического состава паяного шва. Наглядным примером является сравнение рисунков 4.11 и 3.3. По спектрам, показывающим химический состав зоны первичной кристаллизации видно, что с ростом температуры пайки с 1070 °С до 1120 °С в вакууме происходит практически полное испарение марганца. При пайке на воздухе результат будет схожим, но механизм изменения состава будет другим. При пайке в вакууме марганец меняет свою концентрацию за счет высокого давления насыщенного пара, в то время как при пайке на воздухе из-за сильного сродства к кислороду будет происходить окисление и выгорание.

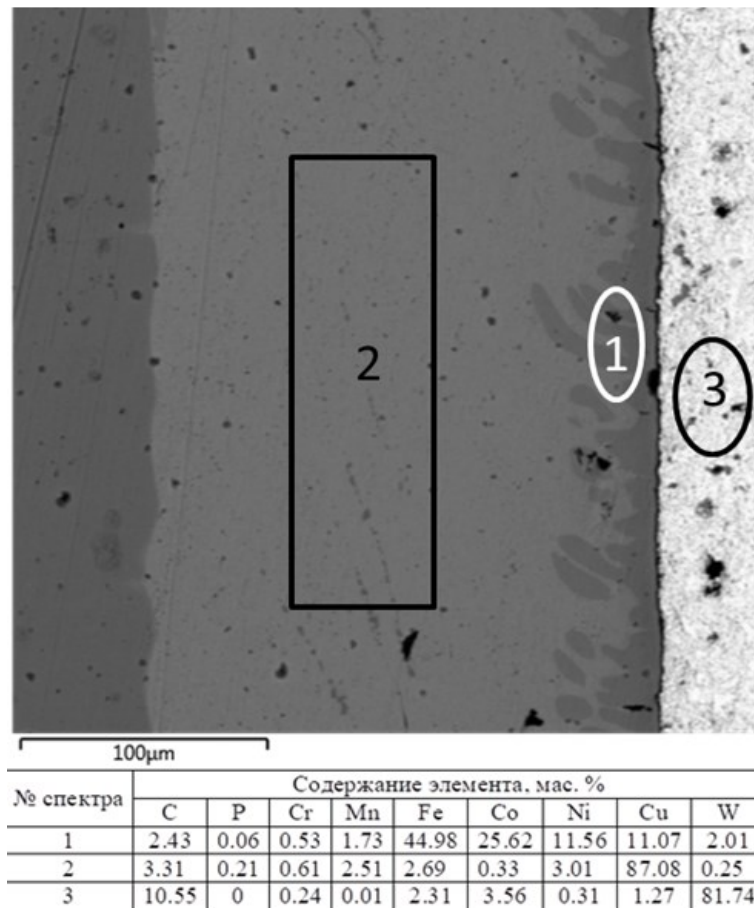


Рисунок 4.11 – Микроструктура образцов 30ХГСА/ВК8, паяных в вакууме припоем МНМц5-25,5 при температуре 1120 °С с временем выдержки 20 мин

#### 4.5. Влияние химического состава стали на предел прочности при испытаниях на срез

На рисунке 4.12 приведены данные по пределу прочности на срез для соединений паяных по режиму 1070 °С с выдержкой 20 мин в зависимости от паяемой стали. Исходя из данных, изображенных на рисунке видно, что паяные соединения твердого сплава со сталью 12Х18Н10Т обладают меньшей прочностью на срез.

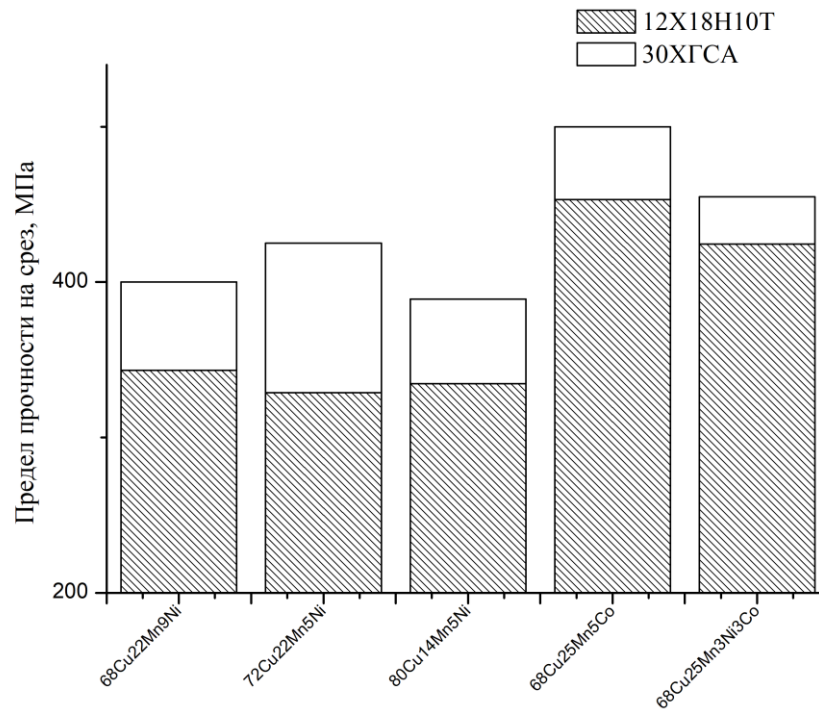


Рисунок 4.12 – Влияние паяемого материала и состава припоя на предел прочности при испытаниях на срез, соединений паяных по режиму 1070 °С выдержка 20 мин

В связи с тем, что различия в части химического состава зоны первичной кристаллизации, при пайке стали 12X18H10T и 30XГСА нет, такое явление может быть связано с тем, что сталь 12X18H10T сильнее теряет свойства при отжиге относительно стали 30XГСА.

#### 4.6. Влияние технологических параметров процесса получения соединений на предел прочности на срез

Влияние технологических параметров процесса пайки на механические свойства иллюстрируется рисунком 4.12 и таблицей 4.4. Закалку производили в масло МЗМ16, после закалки проводили отпуск по режиму 250 °С 120 мин.



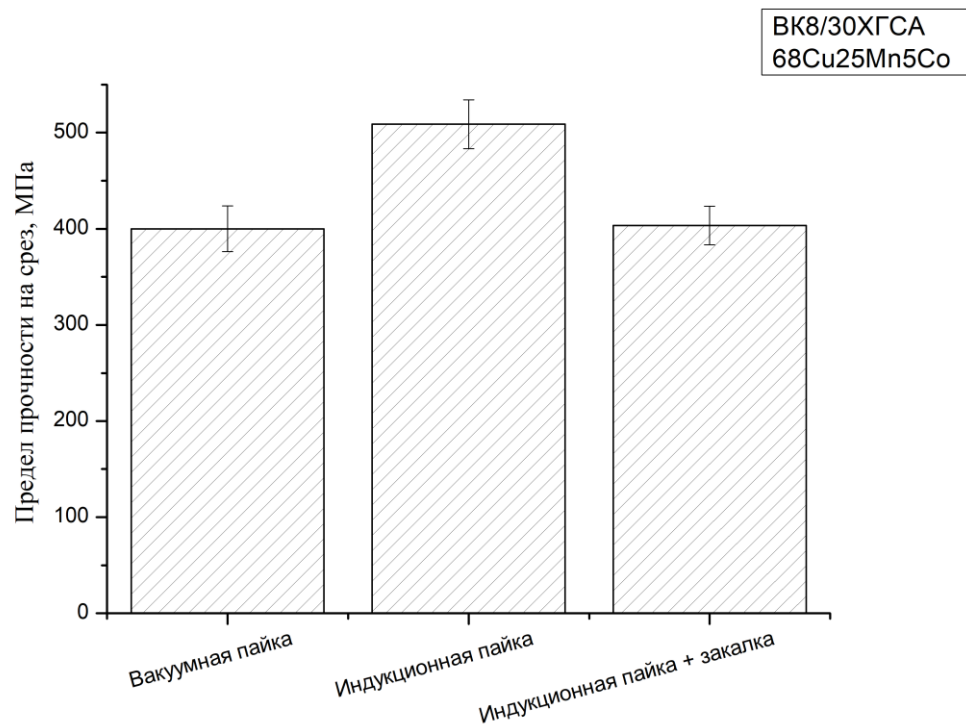


Рисунок 4.12 – Влияние типа нагрева и наличия термообработки на предел прочности при испытаниях на срез

По данным таблицы 4.3 и рисунка 4.12 видно, что по сравнению с вакуумной пайкой, при индукционном методе пайки происходит рост предела прочности на срез от 17 до 30% для различных припоев. Этот факт связан с условиями кристаллизации паяного шва, которые описаны в главе 3.1. Согласно рисунку 3.6 в условиях затвердевания на воздухе, вторая фаза затвердевает по всему объёму шва, а согласно проведенным механическим испытаниям разрушение паяного шва происходит по его центральной части. В связи с этим, упрочнение соединения при индукционной пайке может достигаться путем формирования кристаллитов второй фазы в теле паяного шва.

По данным таблицы 4.3 после проведения закалки и низкого отпуска предел прочности снижается от 16 до 35% для различных припоев. Такое снижение прочности скорее всего связано с образованием остаточных паяльных напряжений, которые не релаксируются низким отпуском в 250 °С. Увеличение температуры отпуска нецелесообразно, так как в этом случае не будет достигаться необходимая для реальных изделий твердость корпуса.

Согласно [47] при температуре отпуска 250 °С сталь 30ХГСА имеет твердость 51 HRC, при увеличении же температуры отпуска до 400 °С твердость падает до 25 HRC. Стандарт [2] говорит о том, что твердость в зоне закалки резца должна иметь уровень 35-45 HRC.

Таблица 4.3 – Механические свойства паяных соединений 30ХГСА/ВК8 в зависимости от состава припоя и технологии изготовления

Марка припоя	Технология изготовления		
	Вакуумная пайка 1020 °С 20 мин	Индукционная пайка 1020 °С 2мин	Индукционная пайка + закалка
68Cu22Mn9Ni	365±20	458±23	295±15
72Cu22Mn5Ni	304±15	444±22	369±19
80Cu14Mn5Ni	328±16	426±21	352±18
68Cu25Mn5Co	400±24	508±25	403±20
68Cu25Mn3Ni3Co	354±29	427±22	341±17

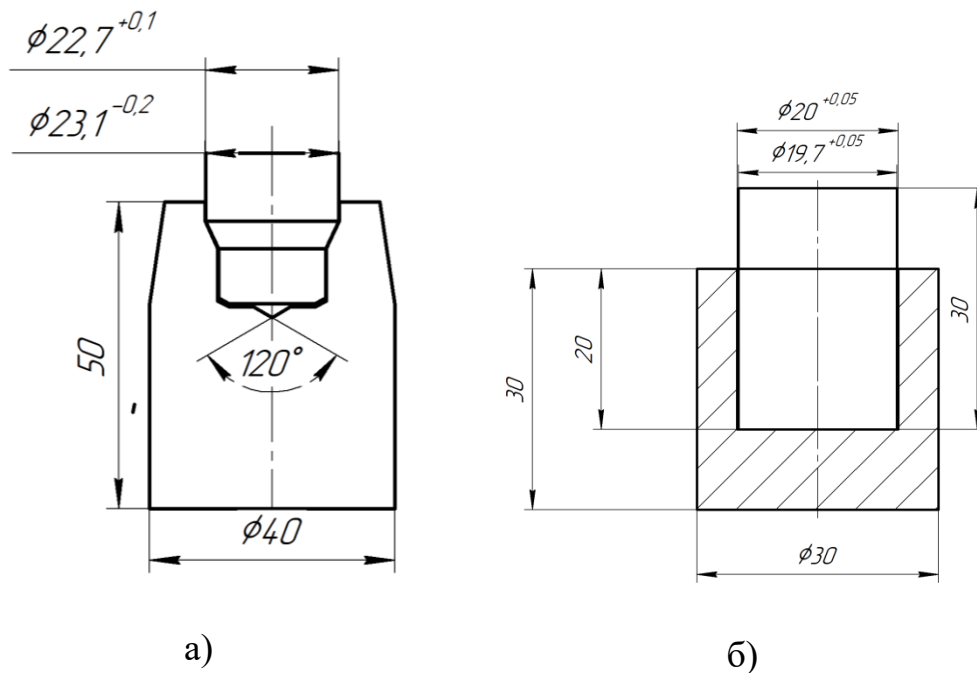
#### **Выводы к главе 4**

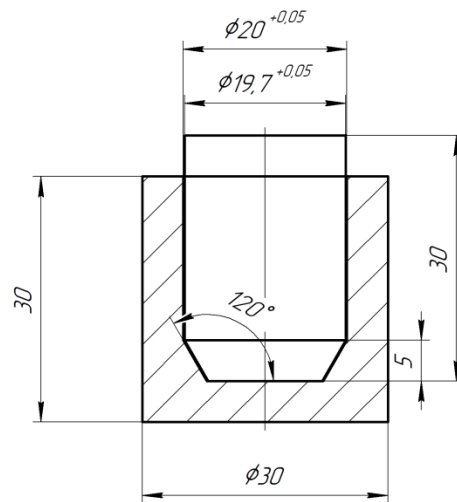
- Обнаружено влияние метода испытаний на стабильность получения результата. При использовании существующих методов испытаний паяных соединений, в ходе приложения нагрузки могут возникать изгибающие напряжения, приводящие к разрушению твердосплавной вставки. В ходе исследований был разработан метод испытаний, обеспечивающий релевантный, статистически прогнозируемый результат.
- Выявлено влияние легирующих элементов в припое на предел прочности при испытаниях на срез. Изменение содержания Ni и Mn не приводят к значительному изменению пределов прочности, в то время как замена Ni на Co сопровождается ростом сопротивлению срезающим нагрузкам.
- Наибольший вклад в изменение механических свойств вносят температурно-временные параметры процесса. При увеличении температуры пайки наблюдается резкое разупрочнение паяного шва, связанное с изменением выходом концентрации Mn в припой: за пределы исследуемых концентраций.
- Установлено влияние технологии нагрева и охлаждения на механические характеристики паяных соединений. При использовании индукционного метода нагрева с охлаждением на воздухе происходит упрочнение соединения, за счет кристаллизующихся по всему объему паяного шва кристаллитов второй фазы.

## Глава 5 Исследование особенностей пайки тангенциальных резцов порошковыми припоями

### 1.1. Типы соединений и конструкция образцов

Как было описано в разделе 1.1, горные резцы по типу паяных соединений условно можно разделить на 3 вида: грибовое, малоуглубленное и цилиндрическое. Наиболее распространенной конструкцией паяного соединения горных резцов являются «цилиндрические» и «грибовые». Исходя из этого, для исследования особенностей пайки тангенциальных резцов порошковыми припоями был разработан образцы, чертежи которых приведены на рисунке 5.1. Изучение влияния схемы нагрева производилось на образцах, изображенных на рисунке 5.1 а, ввиду того, что «грибовые» соединения имеют самую сложную для пайки конструкцию с точки зрения формирования пористости, так как перегиб паяного шва располагается в верхней части соединения, затрудняя всплытие флюсовых остатков. Конструкция образца, изображенного на рисунке 5.1 б иллюстрирует классическое тупиковое паяное соединение, используемое в большинстве типов резцов.





в)

а) образец «грибкового» соединения; б) образец «цилиндрического» соединения; в) образец «цилиндрического» соединения с фаской

Рисунок 5.1 – Эскизы образцов, использованных для макетирования и отработки режимов пайки

На рисунке 5.1 в показан образец цилиндрического тупикового соединения со снятой фаской. Такая конструкция была разработана для облегчения выхода пор при пайке путем уменьшения угла перегиба паяного шва в донной части. На образцах 5.1 б,в проводилось исследование влияние количества и химического состава на образование пористости. В ходе эксперимента использовались стальные вставки, для облегчения резки. Технологические зазоры составляли: 150мкм на сторону.

## 1.2. Разработка составов паяльных смесей для индукционной пайки горных резцов

### 1.2.1. Влияние способа получения порошка припоя на качество паяных швов

Как отмечалось в разделе 1.3.3, паяльная смесь – это механическая смесь из порошков флюсов и припоев. Используемые в промышленности паяльные смеси изготавливаются на основе порошков припоев осколочной формы. Такие порошки получают при распылении расплавов струей воды [100]. По сравнению со сферическими, осколочные порошки имеют гораздо

более низкую насыпную плотность за счет неправильной формы частиц, не способных образовывать плотную упаковку. Флюсовому порошку, в составе паяльных смесей легче удержаться в пространстве между частицами водораспыленного, осколочного порошка припоя. На рисунке 5.2 приведены изображения порошка припоя МНМц9-23,5, полученного методом распыления водой, а на рисунке 5.3 методом распыления газом.

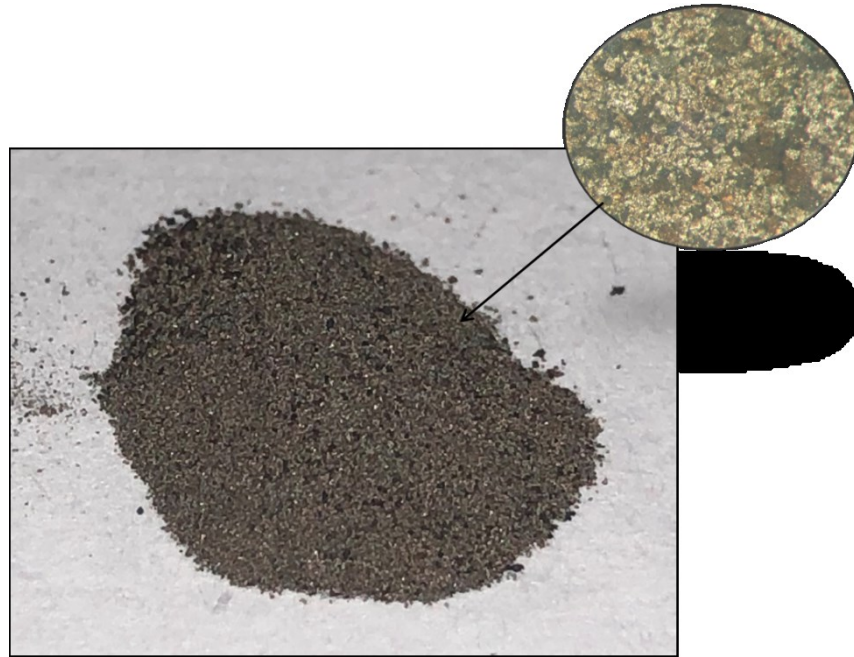


Рисунок 5.2 – Осколочный порошок припоя МНМц9-23,5, полученный методом распыления водой

Из-за высокой температуры ликвидус и большого содержания марганца, порошок получается сильно окисленным, что хорошо демонстрируется зоной увеличения на рисунке 5.2. Насыпная плотность порошка, распыленного водой, составляла  $1,7\text{г/см}^3$ , что соизмеримо с плотностью высокотемпературных флюсов на основе боратов щелочных металлов, значение которой находится на уровне  $1,5 - 1,8\text{ г/см}^3$



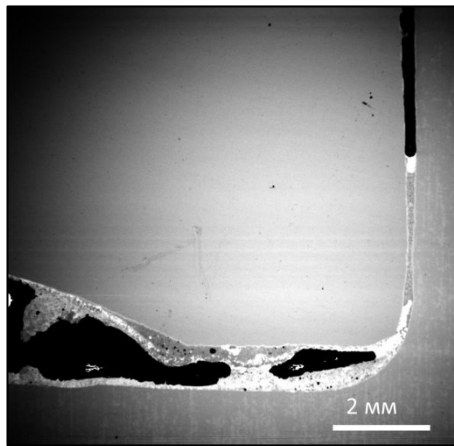
Рисунок 5.3 – Сферический порошок припоя МНМц9-23,5, полученный методом распыления газом

В тоже время, порошок распыленный газом имеет чистую поверхность, характеризуемую металлическим блеском. Частицы такого порошка имеют сферическую форму. Насыпная плотность  $3,7 \text{ г/см}^3$ . За счет способности создавать плотную упаковку между сферами-частицами порошка, и как следствия увеличения насыпной плотности, в паяльных смесях, изготавливаемых на основе сферических порошков, может происходить расслоение компонентов (припоя и флюса).

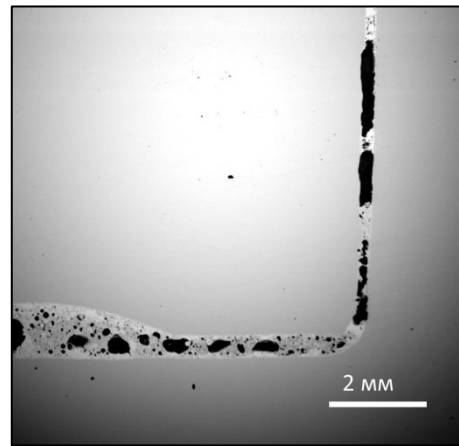
Механизм влияния типа порошка на формирование пористости скорее всего состоял в следующем. Остатки флюса с растворенными в них шлаками и газообразные продукты реакции активного флюса с оксидами припоя и основного материала поднимались вверх и тормозились образующейся в верхней части шва галтелью. Пористости способствовала низкая теплопроводность осколочных порошков, обусловленная воздушным зазором между частицами порошка припоя. Это вело к тому, что припой при нагреве расплавлялся неравномерно. Низкая насыпная плотность припоя вела к тому,

что вставка выпирала из корпуса в процессе нагрева, открывая доступ для дополнительного кислорода.

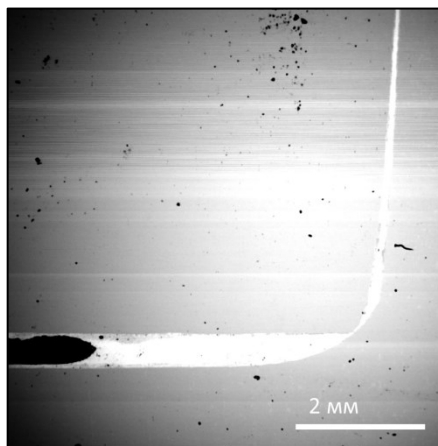
В ходе эксперимента было выявлено, что при пайке стандартными паяльными смесями на основе порошков осколочной формы, имеющих в составе 15 мас.% флюса, формируется сильная пористость. Однако, замена этих порошков на более чистые, сферические кардинально не снижает пористость, лишь слегка уменьшая ее (рисунок 5.4 б). При пайке компактным материалом пористость наблюдается в виде одной газовой поры, располагающейся в центре донной части соединения, что хорошо видно на рисунке 5.4 в.



а)



б)



в)

а) паяльная смесь с припоем, распыленным водой (осколочный порошок); б) паяльная смесь с припоем, распыленным газом (сферический порошок); в) лента толщиной 0,5мм

Рисунок 5.4 – Образцы цилиндрических соединений, паяные припоем

МНМц9-23,%



В ходе данного исследования было выявлено, что в паяльных смесях припоев системы Cu-Mn-Ni предпочтительнее использовать порошки сферической формы. Это связано с несколькими причинами.

Во-первых, использование менее окисленных порошков позволило бы в дальнейшем снизить количество флюса в паяльной смеси. Снижение массовой доли флюса в паяльной смеси в свою очередь уменьшило бы объем дозируемого материала. Уменьшение массы и объема паяльной смеси, закладываемой в отверстие на корпусах резцов под пайку, снизило бы вылет вставки относительно корпуса, и, как следствие, доступ кислорода из внешней среды в соединение во время нагрева под пайку. Таким образом пористость должна была уменьшиться, за счет снижения количества образования вязких, трудноудаляемых шлаков.

Во-вторых, процесс дозирования паяльных смесей на основе осколочных порошков невозможно механизировать. За счет низкой сыпучести таких порошков, дозирующие узлы любого механизированного или автоматизированного оборудования будут заклинивать. В технике есть масса примеров дозирующего оборудования для сферических порошков. Конструкции и принцип работы такого оборудования будут подробнее разобраны в технологической части диссертации. Проблемой при дозировке паяльных смесей на основе сферических порошков является сепарация компонентов, которая решается либо технически за счет обеспечения постоянного перемешивания смеси, либо технологически на этапе изготовления смеси за счет применения связующих веществ, склеивающих частицы флюса и порошка припоя.

### **1.2.2. Влияние схемы нагрева на образование пористости в тупиковых соединениях**

Одним из основных факторов достижения качественного паяного соединения при индукционной пайке является выбор правильного режима нагрева. Режим нагрева включает в себя такие параметры как температура

нагрева, мощность нагрева, время выдержки и положение заготовки в индукторе. Температурно-временные параметры, а также мощность приведены в таблице 2.8.

Пайку образцов проводили по двум режимам нагрева:

1. Производили одновременный нагрев корпуса и вставки. Данный режим моделирует порождение заготовкой щелевого индуктора с последующим выводом верха резца с твердосплавной вставкой на температуру пайки. Иллюстрация процесса изображена на рисунке 3.5 а
2. Производили нагрев корпуса до температуры пайки. Затем производили выдержку таким образом, что вставка разогревалась до температуры пайки за счет теплопроводности через корпус образца и расплав припоя. Иллюстрация приведена на рисунке 5.5 б.

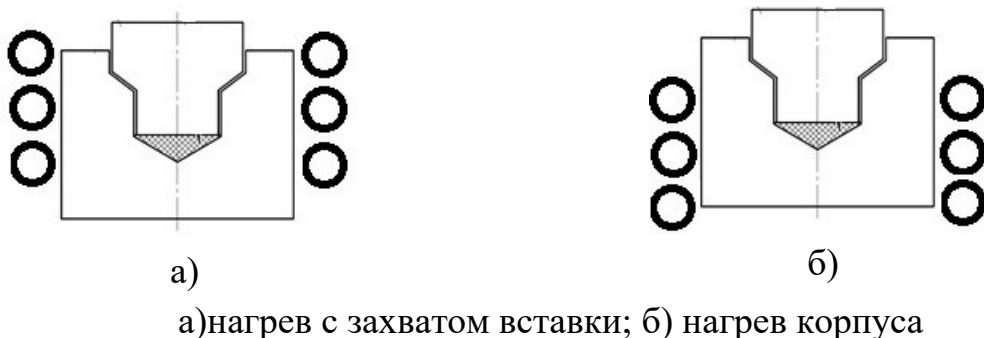
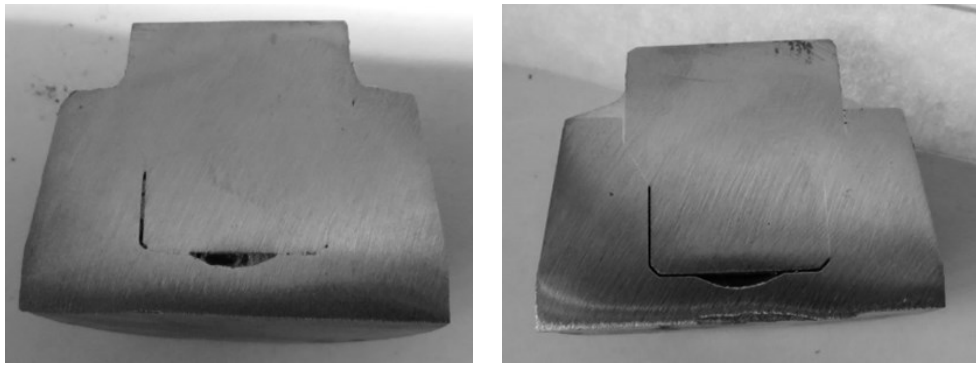


Рисунок 5.5 – Положение индуктора во время пайки

В результате экспериментов получилось следующее. Образцы, паяные по режиму 1 имеют пористость как в донной части, так и в на боковой поверхности шва. Это можно увидеть на рисунке 5.6 а,б.



а)

б)

а) Паяльная смесь МНМц9-23,5; б) 2мм лента из сплава ЛНМц49-9

Рисунок 5.6 – Типичное изображения паяных швов образцов, изготовленных по режиму №1

Компактный материал показывает лучший результат ввиду того, что имеет лучшие теплофизические характеристики, по сравнению с порошковыми сплавами.

После этого был проведен эксперимент по распределению температурного поля в образце при пайке. Результаты данного эксперимента представлены на рисунке 5.7. По рисунку видно, что при сильном перегреве внешних стенок корпуса, донная часть остается практически холодной

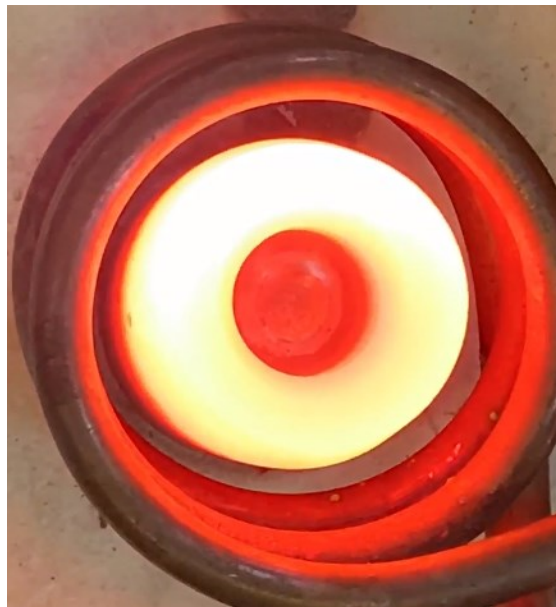
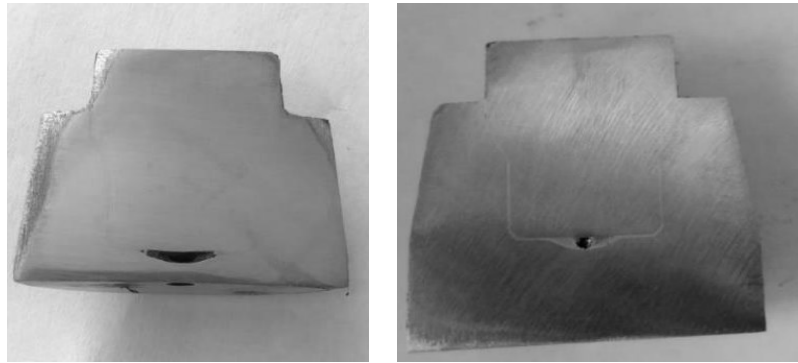


Рисунок 5.7 – Характерное распределение температурного поля в образце при пайке.

Поперечные срезы образцов, паяных по режиму 2, с нагревом за счет теплопроводности представлены на рисунке 5.8.



а)

б)

а) паяльная смесь МНМЦ9-23,5; б) 2мм лента из сплава ЛНМЦ49-9

Рисунок 5.8 – Типичное изображения паяных швов образцов, изготовленных по режиму №2

По изображению образцов на рисунке 5.6 видно, что при изменении режима, пористость в боковой части шва удалось устранить. В ходе эксперимента было выявлено, что для получения качественных соединений, при данной конструкции необходимо производить нагрев снизу. На основе результатов эксперимента была выстроена теория формирования пористости в тупиковых соединениях.

Массо- и теплоперенос внутри соединения происходит по-разному в зависимости от вида используемого припоя. При использовании компактного припоя разогрев припоя происходит при его хорошем тепловом контакте со стенками корпуса. Плавление закладного элемента происходит быстро и равномерно. Разрыву расплава при его течении препятствуют силы когезии. Порошковая система отличается тем, что из-за плохого теплового контакта между частицами плавление порошковой дозы припоя происходит примерно в 2 раза дольше, чем той же массы компактного припоя. При наличии разогретой поверхности стального корпуса рядом с расплавляемой частицей, припой начинает активно смачивать поверхность стали и растекается, перемещаясь к более нагретой поверхности. При этом может образоваться разрыв между частями порошкового закладного элемента. Если верхняя часть корпуса разогревается быстрее сердцевины, то порошковый припой

склонен к быстрому подъему к верхней кромке и образованию кольцевой галтели, которая препятствует из-за разницы давления выходу газообразных продуктов взаимодействия флюса с поверхностью материала.

На рисунке 5.9 изображена схема возникновения закрытой пористости в паяных швах тупиковых соединений. На рисунке 5.10 изображены фотографии корпуса с отверстием без вставки при двух способах формирования теплового поля, что наглядно иллюстрирует распределение температуры в корпусе при нагреве в зависимости от расположения его относительно индуктора.

При формировании теплового поля в заготовке согласно рисунку 5.9 а электромагнитным полем в значительной степени будет разогреваться верхняя часть изделия (включая твердосплавную вставку), а массивный низ будет служить «холодильником»-стоком тепла. Поэтому, при использовании данной схемы нагрева, внешняя часть изделия будет иметь высокую температуру, в то время как внутренняя донная часть корпуса будет холодной. Плавление припоя в таком случае начинается от края закладного элемента, продвигаясь центру. Часть расплава перетекает в наиболее горячие места соединения, которые располагаются у галтельной части, тем самым блокируя выход газов и шлаков, образующихся при дальнейшем плавлении.

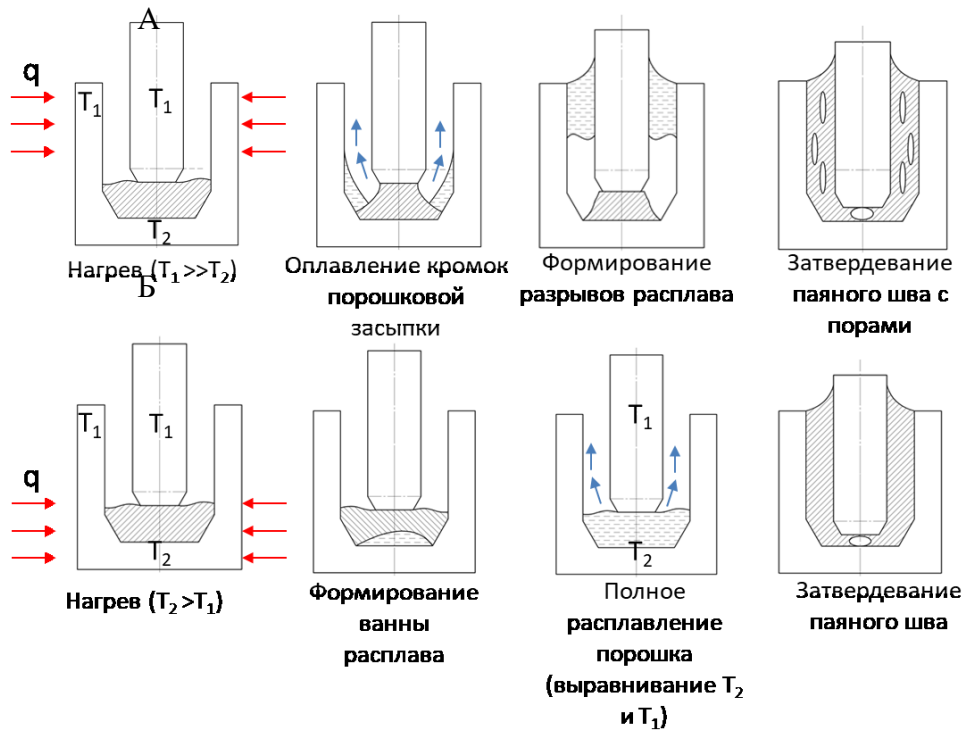
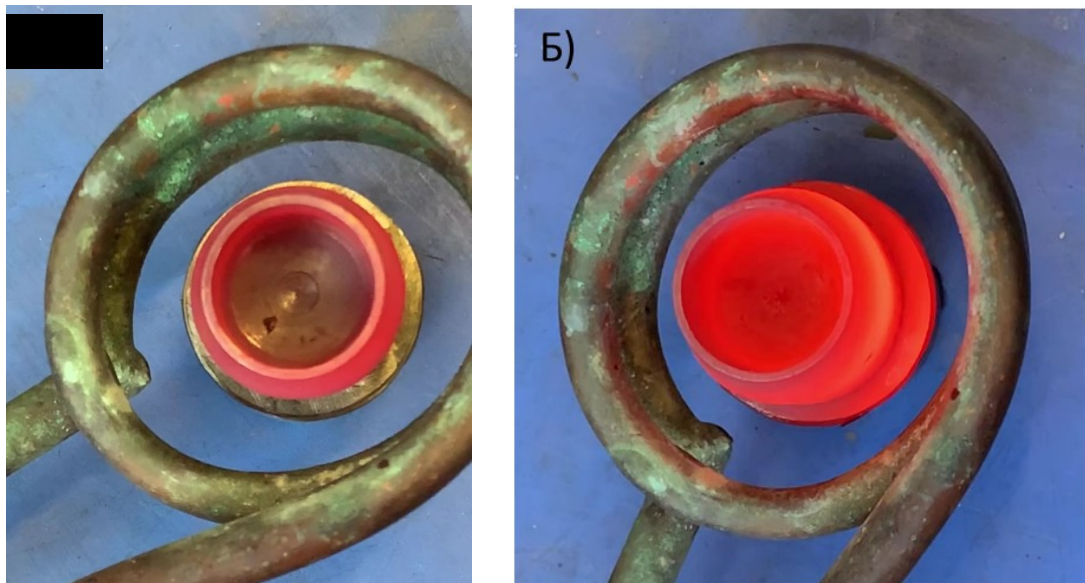


Рисунок 5.9 – Схема возникновения пористости в паяных швах тупиковых соединений



а) – при верхнем нагреве, б) – при нижнем нагреве корпуса.

Рисунок 5.10 - Распределение температуры в корпусе в зависимости от типа нагрева

Проблема частично решается при подаче теплового потока схеме 5.9 б. В донной части корпуса изделия образуется тепловой замок, препятствующий стоку тепла. При этом наиболее горячая зона находится в донной части паяного шва, а выход на температурный режим осуществляется не путем встречного нагрева сверху и снизу, а направленным нагревом снизу. В таком случае плавление припоя происходит более равномерно - от центра. Таким образом, шлаки вытесняются вверх, в галтельную часть соединения.

Такая закономерность растекания порошковых припоев позволяет получить высокое качество соединений, в частности на порошковых припоях системы Cu-Mn-Ni.

Так же немаловажным фактором является зазор при пайке. Паяльный зазор должен наводиться в пределах 150-200мкм на сторону. Однако, стоит понимать, что при пайке разнородных материалов с сильно различающимися ЛКТР паяльный и технологический зазор будут очень разными. В реальных изделиях с твердосплавными вставками при нагреве сталь 30ХГСА и твердый сплав ВК8 расширяются на разную величину. С учётом температуры пайки 1000 °С и исходным сборочным зазором в 150мкм разницу в диаметрах вставки и отверстия корпуса можно определить по уравнению(2):

После пайки и продольной образцов реальных изделий на оптическом микроскопе была выявлена средняя величина зазора. Результаты представлены на рисунке 5.11. Следует отметить, что фактическая ширина шва соответствует промежуточной величине между конструкционным сборочным зазором и зазором при температуре пайки. По мере кристаллизации припоя увеличивается его сопротивление сжатию за счет уменьшения размеров корпуса, поэтому конечная ширина шва составляла 220 мкм.

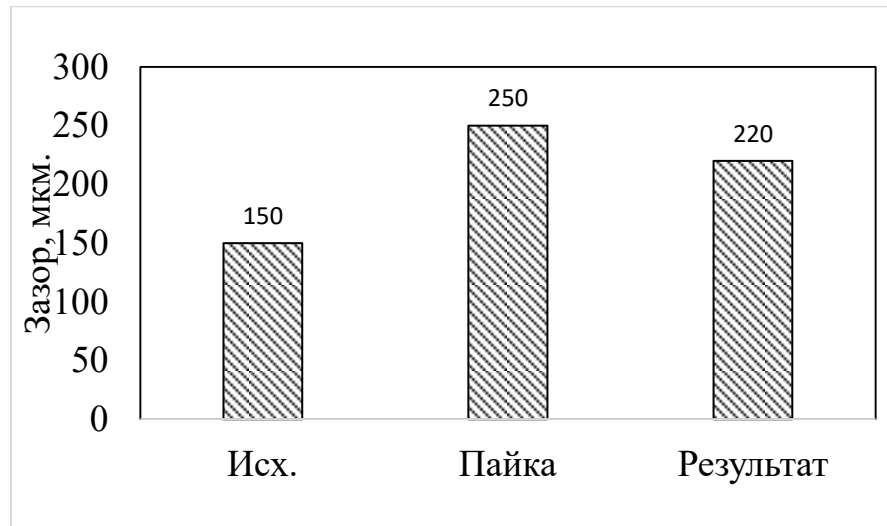


Рисунок 5.11 - Величина зазора/ шва при пайке твёрдосплавной вставки ВК8 диаметром 20 мм со сталью 30ХГСА.

#### 1.2.2.1. Исследование влияния содержания флюса в паяльной смеси и его химического состава на формирование пористости в тупиковых соединениях

Следующим фактором, влияющим на формирование пористости в паяном соединении, после конструкции соединения и режима нагрева является состав паяльной смеси, а именно химический состав флюса и его количество.

Механизм работы флюса заключается в подготовке условий для растекания припоя по паяемым поверхностям: удаление уже имеющихся загрязнений и оксидов, а также препятствие образованию оксидов в момент нагрева и пайки. Паяльная смесь должна содержать в себе такое количество флюса, которого хватит для создания качественного, плотного соединения. При содержании флюса меньше необходимого возможно получение пор за счет несмачивания припоем паяемой поверхности. Либо при способности металла к объемному окислению (сплавы на основе титана, марганца, циркония) в паяном шве будут обильно образовываться неметаллические включения. При превышении необходимого количества флюса, флюсовые



остатки будут трудно удаляться, и в соединении будут образовываться флюсовые и газовые поры.

Эксперименты данной главы были нацелены на изучение влияния конструкции соединений, количества и химического состава флюсов на качество паяных соединений. Основным оцениваемым параметром была пористость соединений в вертикальной части паяных соединений. Величиной оценки пористости являлась удельная пористость: процентное отношение протяженности пор к общей протяженности паяного шва. Пористость в донной части тупикового паяного шва не учитывалась ввиду того, что она не является нагруженным участком в ходе эксплуатации горных резцов.

На первом этапе эксперимента согласно таблице 2.4 и главе 2.2 были изготовлены образцы паяльных смесей с различной концентрацией флюса. В качестве модельного для определения содержания флюса использовался ФК260. Пайку проводили согласно итогам эксперимента, описанного в главе 5.1.2.2: нагрев производили таким образом, чтобы рост температуры происходил из части соединения с засыпанной в нее паяльной смесью. На рисунках 5.12 и 5.13 показаны зависимости насыпной плотности, и высоты заполнения технологического отверстия от содержания флюса в паяльной смеси.

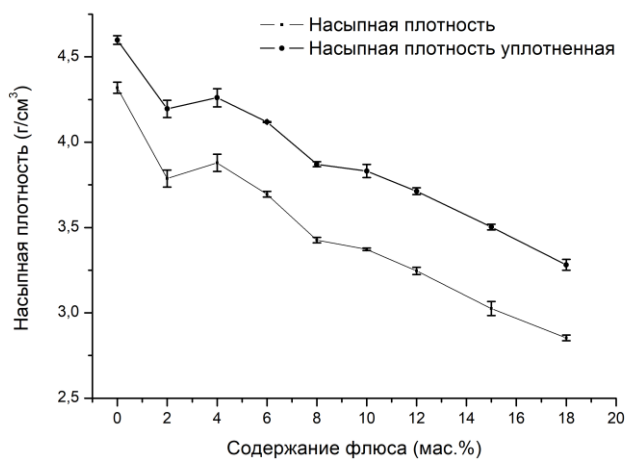


Рисунок 5.12 – Зависимость насыпной плотности паяльной смеси от содержания флюса

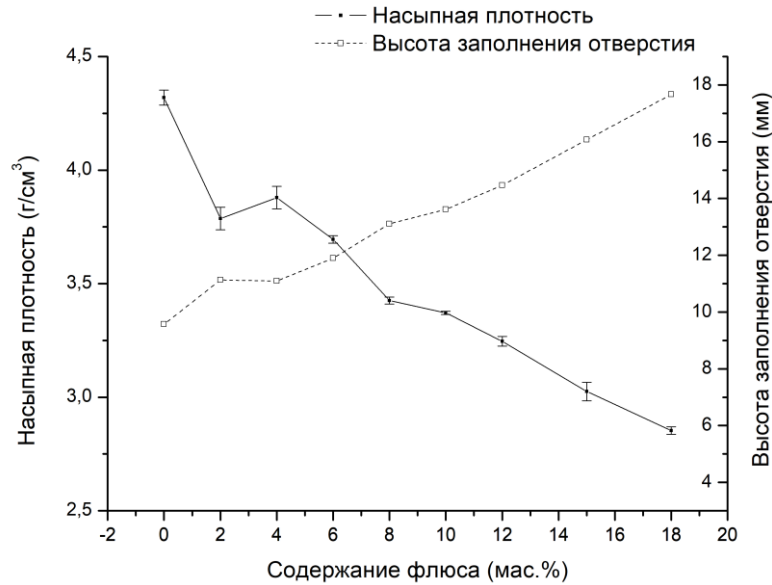


Рисунок 5.13 – Зависимость высоты заполнения паяльной смесью технологического паза от насыпной плотности для отверстия 20мм

По рисункам видно, что с увеличением содержания флюса, насыпная плотность паяльной смеси падает более чем на 50% по сравнению с чистым порошком. В это же время график 5.13 наглядно иллюстрирует, что при снижении насыпной плотности паяльной смеси, объем, занимаемый ею, будет линейно расти. Это означает, что при увеличении концентрации паяльной смеси, вставка, вставляемая в технологическое отверстие на корпусе резца, будет открывать доступ для дополнительного кислорода в соединение до того момента как произойдет расплавление порошка припоя. На рисунках 5.14 и 5.15 изображено влияние количества флюса и конструкции соединения на удельную пористость.



Рисунок 5.14 – Зависимость удельной пористости в цилиндрических соединениях от содержания флюса в паяльной смеси

Согласно данным на рисунке 5.14 в цилиндрических практически при любом содержании флюса в паяльной смеси, за исключением 8 мас.%, формируется сильная пористость. При увеличении содержания флюса свыше 8 мас.%, из-за наличия резких перегибов в паяном шве, удаление избытков флюса, флюсовых остатков и газов не происходит равномерно и стабильно, даже при правильном режиме нагрева. При снижении концентрации флюса до 4% в паяном соединении начинают образовываться тугоплавкие шлаки, на растворение которых не хватает находящегося в паяльной смеси флюса. Идентичная тенденция наблюдается на образцах с фасками, данные по удельной пористости на которых изображены на рисунке 5.15.



Рисунок 5.15 – Зависимость удельной пористости в цилиндрических соединениях с фаской от содержания флюса в паяльной смеси

За счет наличия фаски вдвое уменьшается угол перегиба на пути образовавшихся остатков флюса, газов и шлаков. Из-за отсутствия прямого угла отсутствует и зона застоя. Таким образом выход порообразующих остатков облегчается. Это иллюстрируется рисунком 5.15. При сохранении тенденции удельная пористость уменьшается.

На основании полученных данных, стало понятно, что стандартная, содержащая 15 мас.% флюса паяльная смесь не подходит для пайки тупиковых соединений. Для пайки горных резцов решено было использовать содержание флюса 8 мас.%.

Далее исследовалось влияние химического состава флюса на образование пористости в тупиковых соединениях. Для этого были изготовлены паяльные смеси с содержанием флюса 8 мас.%. Использовались флюсы ФК260, ПВ200 и ФК250. Эксперимент проверял ряд гипотез. Самым низкотемпературным флюсом из вышперечисленных является ФК250. Этот флюс зачастую используется при пайке медных сплавов и сталей припоями системы Cu-P и Ag-Cu, температура пайки которыми не превышает 800 °С. Температура пайки припоями системы Cu-Mn-Ni находится выше 900 °С. Предполагалось, что в качестве флюса ПВ200, наносимого на вставку хватит

для защиты поверхности при пайке. Низкотемпературный же ФК250, находящийся в составе паяльной смеси и начинающий работу раньше по сравнению с ПВ200, должен был защитить порошок припоя от окисления в процессе нагрева под пайку. ФК260 является наиболее распространённым при пайке сталей и твердых сплавов в промышленности флюсов. ПВ200 является высокотемпературным флюсом, близким по химическому составу к ПВ200. Предполагалось, что использование его в паяльной смеси поможет удалению высокотемпературных шлаков. Результаты эксперимента приведены на рисунке 5.16

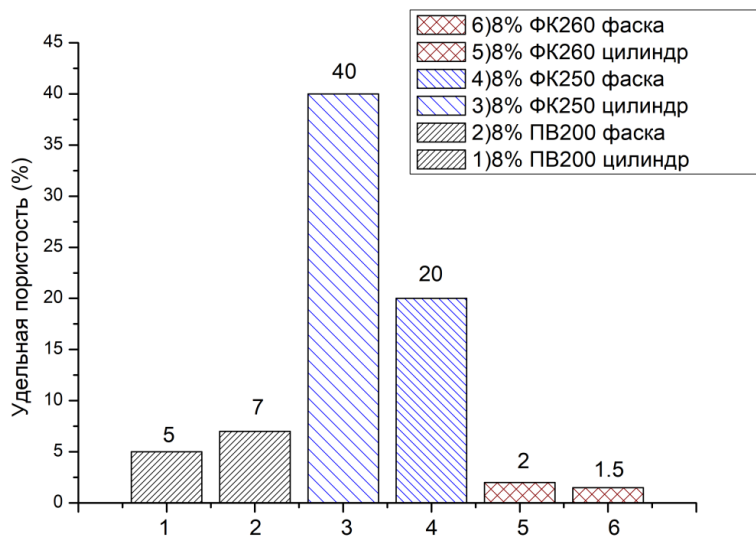


Рисунок 5.16 – Зависимость удельной пористости в тупиковых соединениях от химического состава флюса в паяльной смеси

Как видно, по данным на рисунке 3.16, при использовании флюса ФК250 в соединении образуется большое количество пор. Наименьшее количество пор (2,5%) образуется при использовании флюса ПВ200 (рисунок 3.16) и флюса ФК260 (данные представлены на рисунке 5.15). Итогом эксперимента стало принятие решения об использовании 8 мас.% флюса ФК260 в паяльных смесях для пайки тупиковых соединений горного инструмента.

## Выводы по главе 5

- Выявлено влияние технологии получения порошка на образование пористости в тупиковых соединениях. Применение распыленного газом, сферического порошка, имеющего менее окисленную по сравнению с распыленным водой поверхность, позволяет снизить количество шлаков и флюсовых остатков в соединении.
- Применение сферического порошка позволяет увеличить насыпную плотность паяльной смеси, что снижает высоту заполнения технологического паза на корпусах резцов, что в свою очередь снижает доступ кислорода в паяный шов и уменьшает окисление.
- Установлено влияние формирования теплового поля в заготовке на пористость. При подаче теплового потока нижнюю часть корпуса резца, в донной части образуется тепловой замок, препятствующий стоку тепла. При этом наиболее горячая зона находится в донной части паяного шва, а выход на температурный режим осуществляется не путем встречного нагрева сверху и снизу, а направленным нагревом снизу. В таком случае плавление припоя происходит более равномерно - от центра. Таким образом, шлаки вытесняются вверх, в галтельную часть соединения, а пористость на боковых стенках соединения стремится к минимуму.
- Обнаружено, что конструкция соединения влияет на пористость. Конструкция с цилиндрической формой вставки более склонна к образованию пор при пайке. Снижение пористости достигается путем посадки вставки в корпус на конус в нижней части соединения.
- Установлено, что при увеличении количества флюса в паяльной смеси свыше 12 мас.% происходит резкий рост удельной пористости в паяных соединениях, за счет формирования протяженных участков паяных швов, заполненных флюсом.

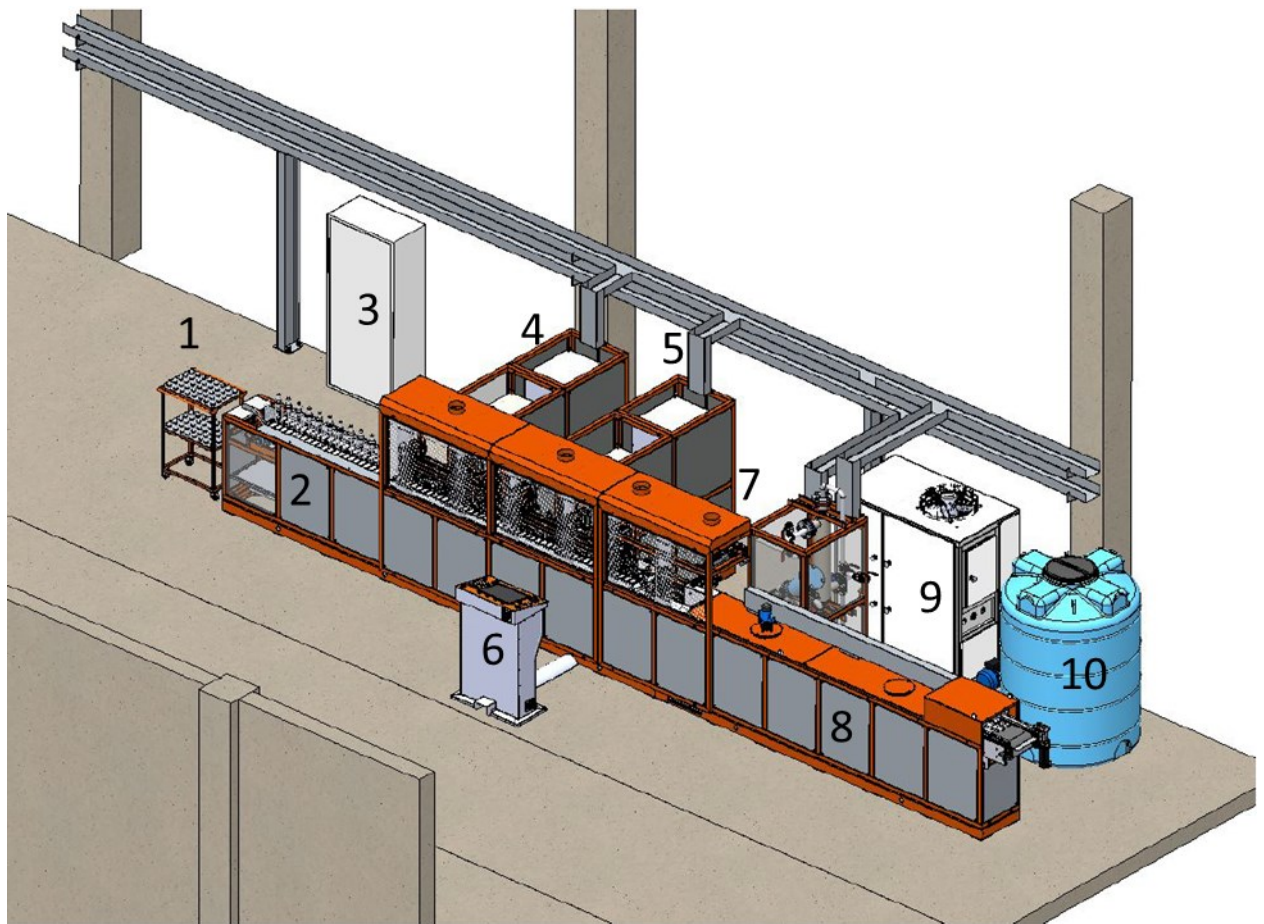
## Глава 6 Технология пайки горных резцов на конвейерной линии

На основе экспериментальных данных, полученных в ходе исследований, описанных в главах 3-5 была разработана порошковая смесь для пайки горных резцов, выбран режим нагрева под пайку, а также выявлены факторы, критически влияющие на механические свойства соединений сталь/твердый сплав.

Согласно 5.2.2, для минимизации пористости в составе паяльной смеси решено было использовать 8 мас.% порошкового флюса ФК260. Основным компонентом паяльной смеси был выбран порошок МНМц9-23,5, полученный методом газового распыления, как наиболее подходящий по температуре солидус (910 °С) для закалки стали 30ХГСА (880 °С). Для обеспечения теплового поля, позволяющего производить нагрев твердосплавной вставки через расплавленную ванну припоя, в ходе исследований главы 6 был разработан индуктор и подобраны технологические режимы его работы.

Для достижения диспергирования железо-кобальтовой фазы и упрочнения паяного шва, процессы пайки и закалки на конвейере разделены на 2 индуктора, между которыми имеется расстояние, проходя которое паяный шов затвердевает со скоростью порядка 20 °С/с..

Исходя из вводных данных, в ходе экспериментальных исследований была разработана технология пайки горных резцов порошковыми материалами. Наряду с этим, с учетом особенностей нагрева и пайки заготовок, описанных в главе 5, была разработана функциональная модель и компоновочная схема оборудования, представленная на рисунке 6.1.



1 – тележка с собранными резцами; 2 – подающий конвейер; 3 – щит электропитания; 4 – генератор ТВЧ 100 кВт для нагрева под пайку; 5 – генератор ТВЧ 250 кВт для нагрева под закалку; 6 – пульт управления линией; 7 – прижимное устройство; 8 – закалочная ванна; 9 – охладитель закалочной жидкости; 10 – охладитель силового блока

Рисунок 6.1 – Общий вид конвейерной линии для пайки горных резцов

Номенклатура паяемых изделий состояла из 8 позиций, различающихся между собой по габаритам корпуса и диаметру твердосплавной вставки. Масса изделий варьировалась от 0,5 до 2 кг, а диаметр вставки от 15 до 24 мм. Номенклатура изделий представлена в таблице 6.1, последняя цифра означает диаметр твердосплавной вставки. Основываясь на габаритах и массе изделий, для обеспечения равномерного и энергоэффективного нагрева пайки и закалка производилась на разных индукторах.



### 6.1. Юстировка параметров пайки на линии

На рисунке 6.2 показаны дистанции регулировки индуктора относительно детали, подлежащие настройке и контролю. В таблице 6.1 указано положение индуктора относительно изделий. Дистанция 2 на рисунке 1 являет собой расстояние от медной пластины крепления индуктора до центра резцедержателя.

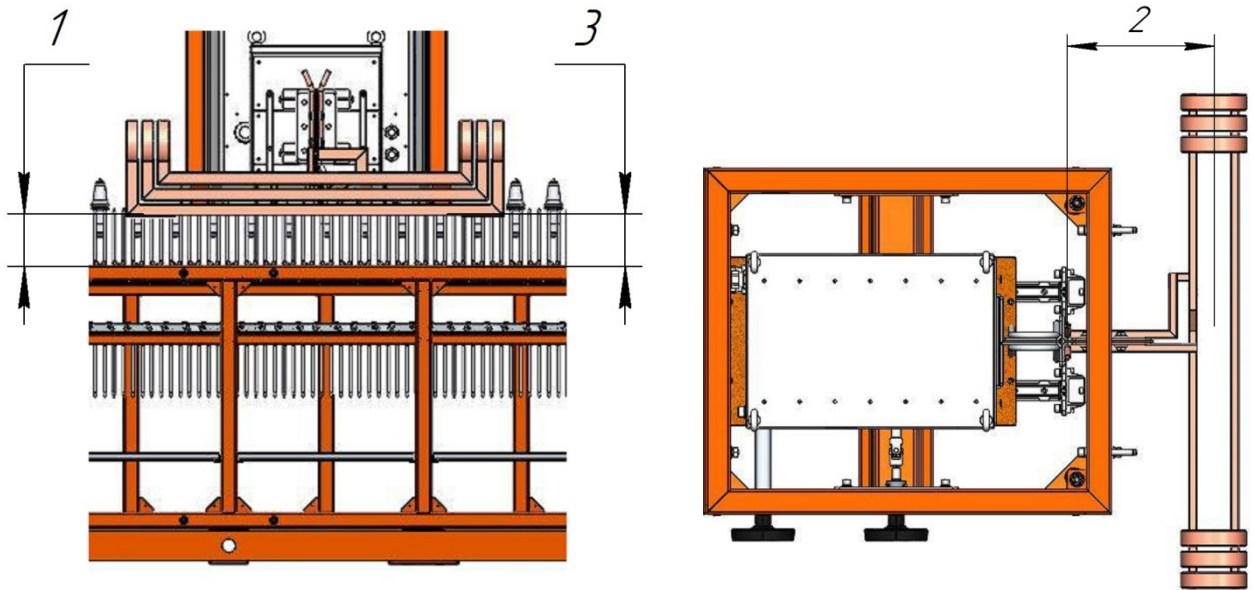


Рисунок 6.2 – Схема дистанций регулировки индуктора относительно детали, подлежащие настройке и контролю

Юстировочные параметры, представленные в таблице 2 подбирались путем пирометрического контроля равномерности нагрева заготовок. В индукторе 1 обеспечивалась схема нагрева, описанная в 5.2.2, заключающаяся в косвенном нагреве твердого сплава за счет теплопередачи от расплавленного порошкового припоя. В индукторе 2 обеспечивался равномерный разогрев всего изделия до закалочной температуры.

Таблица 6.1 - Технологические параметры юстировки установки

Марка резца (диаметр хвостовика/ диаметр вставки, мм)	№ индукт ора	Дистанци я №1, мм	Дистанц ия №2, мм	Дистанция №3, мм
25/18	1	218	503	218
	2	120	503	125
30/15	1	225	503	225
	2	120	503	122
33/15	1	232	503	232
	2	110	503	115
35/22	1	235	503	235
	2	110	503	115
38/22	1	222	503	222
	2	115	503	120
38/17,5	1	240	503	240
	2	120	503	120
30/24	1	225	503	225
	2	120	503	122

## 6.2. Технологическая цепочка пайки резцов

Общий принцип работы комплекса оборудования заключался в следующем. Рабочий осуществляет сборку изделий под пайку на рабочем столе 1. Параллельно с этим рабочий устанавливает собранные заготовки в резцедержатели на подающем конвейере 2. Шаговый подающий конвейер 2

продвигает резцы в первый индуктор на генераторе ТВЧ 4 для пайки, а затем во второй индуктор на генераторе ТВЧ 5 для закалки.

Процесс пайки горных резцов состоит из четырех этапов:

### **1. подготовка поверхности.**

После токарной обработки, с заготовок должны удаляться остатки масла и стружки. Отмывка корпусов производится безворсяной тряпкой, смоченной растворителем типа НЕФРАС. Твердосплавные вставки обезжириваются в ультразвуковой ванне с растворителем НЕФРАС. Перед пайкой необходимо производить входной контроль на наличие загрязнений корпусов и твердосплавных вставок. В случае наличия вышеописанного резцы возвращаются на отмывку;

### **2. сборка.**

Сборка резцов производится на сборочном столе. На столе находятся материалы для пайки в специальной таре, заготовки корпусов и твердосплавных вставок, дозатор припоя.

1. Первым этапом является засыпка необходимого количества паяльной смеси в отверстие на корпусе резца.

В таблице 6.2 приведено количество припоя в зависимости от типа горного резца, полученное путем теоретического расчета и экспериментальной корректировки.

Таблица 6.2 – Количество припоя

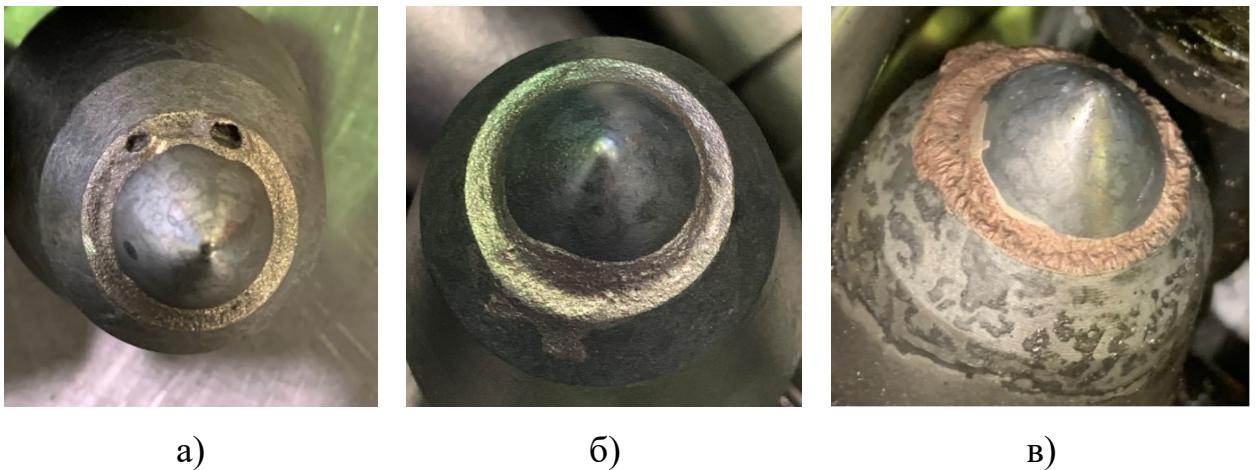
№ п.п	Типоразмер изделия	Количество припоя, г
1	25/18	0,83
2	33/15	2,6
3	35/22	2,9
4	38/22	4,2

5	38/17,5	3,7
6	30/24	4,2
7	25/18	1,5

Дозирование припоя осуществляется ложечными дозаторами с фиксированным объемом, рассчитанным для каждого типа резцов.

2. Далее происходило покрытие заготовок флюсовым материалом.

Для этого флюсовую пасту разводили водой в пропорции 1:4, до консистенции жидкой сметаны (суспензии). Подбор концентрации проводился опытным путем. При недостаточной концентрации флюса происходило подгорание и окисление галтели (рисунок 6.3 в). При чрезмерной концентрации флюсующей суспензии в галтели образовывались раковины (рисунок 6.3 а). На рисунке 6.3 б) представлен бездефектный резец, паяный с использованием суспензии флюса оптимальной концентрации.



а) разбавление водой 1:2; б) разбавление водой 1:4; в) разбавление водой 1:8

Рисунок 6.3 – Влияние концентрации флюсующей суспензии на внешние дефекты паяного шва

Вставки помещали в подготовленный раствор. Затем после покрытия флюсом устанавливали в корпус. После этого кистью офлюсовали кольцевой участок корпуса толщиной 10-15мм ниже паяного шва. Это делалось для предотвращения окисления корпуса в месте наибольшего термического воздействия.

### 3. пайка

При запуске процесса пайки вначале конвейера устанавливались 7 «холостых» резцов для вывода установки на режим. Эта операция предотвращает пережог первых резцов, заходящих в индуктор. В паяльном индукторе размещается 7 заготовок. В момент старта процесса коэффициент распределения индуктора меняется от 0,14 до 1, что приводит к перераспределению заданной мощности в меньшее количество металла.

Конвейер установки приводится в движение шаговым двигателем, поэтому помимо мощности, выдаваемой силовым блоком, температурно-временные параметры процесса пайки управляются временем шага конвейера. Режимы нагрева для каждого изделия подбирались с учетом проведения пайки при температуре ниже 1000 С, согласно главе 4. Параметры режимов пайки приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Режимы пайки резцов

Тип резца	№ стака на	ИБ-1		ИБ-2		Параметры конвейера	
		№ индукт ора	Р, кВт	№ индукто ра	Р, кВт	Шаг, мм	Врем, с
25/18	2	1.1	70	2	80	63	10
33/15	3	1.1	100	2	85	63	15
35/22	4	1.1	78	2	90	126	25

38/22	4	1.1	81	2	85	126	25
38/17,5	4	1.1	85	2	93	126	25
30/15	3	1.1.	105	2	80	63	15
30/24	3	1.1	90	2	90	126	22
38/22	4	1.1.	85	2	70	126	25

В таблице 6.3 в графе № стакана, указан номер стакана, в который устанавливаются резцы на конвейере. Стаканы различаются высотой и диаметром. Высота обеспечивает наряду с параметрами, описанными в 6.1 необходимую схему нагрева, а диаметр посадку хвостовика резца. В графе шаг указана длина шага конвейера при пайке того или иного резца. Шаг конвейера зависит от габаритов резцов. Для крупногабаритных резцов невозможна установка в каждый стакан на конвейере, поэтому они устанавливаются через один. В соответствии с этим, при увеличении длины шага, для обеспечения необходимой температуры пайки увеличивается и его время.

На последнем шаге паяльного индуктора было установлено специальное прижимное устройство, изображенное на рисунке 6.4. Рабочая часть прижимного устройства изготавливалась из парамагнитного материала, титанового сплава ВТ6, для уменьшения воздействия на него электромагнитного поля индуктора. Движение рабочей части в вертикальной плоскости осуществлялось при помощи пневмоцилиндра. В тоже время на рабочую часть прижимного устройства в момент его работы подавалась вибрация частотой 50 Гц и амплитудой 10мкм.



Рисунок 6.4 – Прижимное устройство

Функцией прижимного устройства являлась дополнительная дегазация паяного шва за счет вибрации, удаление флюсовых остатков из горизонтальных участков шва, а также осаждение твердосплавных вставок в корпус согласно рабоче-конструкторской документации.

После отработки режимов пайки и получения опытной партии продукции, производили механические испытания, согласно ГОСТ Р 51047-97. В ходе испытаний проводили сравнение стандартного, компактного припоя ЛНМц49-9-0,2 в виде таблеток, получаемых из экструдированной ленты и разработанной в ходе диссертационной работы паяльной смеси МНМц9-23,5. Результаты испытаний показали, что механические свойства резцов, паяных на автоматической линии паяльной смесью МНМц9-23,5 более чем на 100% превышают предел прочности на срез соединений, паяных стандартным припоем.

Таблица 6.4 – Результаты испытаний опытной партии резцов

№ п.п.	Предел прочности на срез, МПа	Марка припоя
1	460±20	Паяльная смесь МНМц9-23,5
2	264±25	Высечка из ленты ЛНМц49-9-0,2

## Выводы по работе

1. Из литературных источников установлено, что для увеличения механических характеристик паяных соединений тангенциальных резцов возможно применение сплавов Cu-Mn-Ni.
2. Выявлено, что при соединении твердых сплавов со сталями при помощи медно-марганцевых припоев легированных Ni и Co микроструктура паяного шва имеет в составе две фазы: твердый раствор на основе Cu, близкий по составу к припою и высокотемпературная железо-кобальтовая, образующаяся в результате растворения Fe и Co из стали и твердого сплава соответственно.
3. Химический состав второй фазы изменяется при легировании припоя Co: с ростом концентрации Co в припое происходит рост его концентрации во второй фазе с порядка 20 мас.% для припоев легированных никелем до порядка 40 мас.% для припоев, легированных кобальтом. При этом в месте контакта расплава с твердым сплавом, на последнем образуется зона обедненная по Co.
4. Установлена роль тонких металлических покрытий в формировании структурно-фазового состояния, состоящая в изменении поверхностного натяжения, на границе расплав/твердый сплав. Температурные зависимости краевых углов смачивания имеют убывающий характер с плавным выходом на плато для Ni и Cu. Без покрытия краевой угол смачивания составляет  $15^\circ$ . Минимальный угол смачивания получен на Ni покрытии и составляет  $6^\circ$ . На покрытия Al, Cr и Ti для получения угла смачивания меньше  $10^\circ$  нужны высокие температуры, свыше  $1200^\circ\text{C}$ .
5. Установлено, что толщина зоны обеднения по Co в твердом сплаве зависит от температуры и не зависит от материала покрытия и количества жидкости, взаимодействующей с подложкой. Глубина зоны обеднения по кобальту уменьшается на 50% при снижении температуры пайки с  $1120^\circ\text{C}$  до  $1020^\circ\text{C}$ .



6. Определено, что при использовании существующих методик испытаний паяных соединений, для разнородных соединений с пределами прочности превышающими 400МПа, в ходе приложения нагрузки возникают изгибающие напряжения, приводящие к разрушению твердосплавной вставки.
7. Разработана методика испытаний, обеспечивающая релевантный, статистически прогнозируемый результат, исключая влияние изгибающих напряжений. Устранение изгибающих напряжений происходит за счет применения цилиндрической геометрии образцов. Применение разработанной методики позволило снизить относительную погрешность с 30% до 5%.
8. Выявлено влияние легирующих элементов в припое на предел прочности при испытаниях на срез. Изменение содержания Ni и Mn не приводят к значительному изменению пределов прочности, в то время как рост концентрации Ni или же замена его на Co в припое сопровождается ростом сопротивлению срезающим нагрузкам на величину до 35%.
9. Наибольший вклад в изменение механических свойств вносят температурно-временные параметры процесса. При увеличении скорости охлаждения паяного шва, происходит упрочнение на величину до 30% за счет кристаллизации Fe-Co фазы по всему объему соединения. Рост температуры пайки приводит к резкому разупрочнению паяного шва на величину до 47%, связанному с уменьшением концентрации Mn в припое;
10. Установлено, что для обеспечения минимальной пористости в паяном шве необходимым условием является создание температурного поля, обеспечивающего нагрев твердосплавных вставок и галтельной части соединения за счет образования ванны расплава и направленного течения припоя от дна к галтельной части.
11. Разработан состав паяльной смеси. Установлено, что смесь должна содержать от 4 до 8 мас.% флюса, содержащего фторборат натрия в качестве

активного вещества для снижения пористости в соединении до минимального удельного значения в 2,5%.

12. Разработан технологический процесс пайки тангенциальных резцов порошковыми смесями на основе припоев Cu-Mn-Ni, включающий в себя методы и режимы нагрева под пайку, способы дозирования флюсовых и паяльных материалов. Предел прочности на срез резцов, паяных порошковыми смесями на основе припоев Cu-Mn-Ni более чем на 100% превышает предел прочности резцов, паяных стандартным компактным припоем ЛНМц49-9-0,2.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Крапивин М.Г. Горные инструменты [Текст] / М.Г. Крапивин М.Г., И.Я Раков, Н.И. Сысоев ; - Москва: Недра, 1990. - 256с.
2. ГОСТ Р 51047-97. Резцы для очистных и проходческих комбайнов. Общие технические условия. - М.: ИПК Издательство стандартов, 1997
3. Каталог продукции Betek GmbH & Co. KG [электронный ресурс] –URL: <https://www.betek.de/en/products/mining/user-information/kd/produktkatalog-bergbau.html> (дата обращения 20.09.2021) . –Текст: электронный.
4. Chen W., Zhang L. Cemented Carbides – An Outstanding Class of Refractory Based Alloys // *Encycl. Mater. Met. Alloys*. Elsevier, 2022. P. 383–393.
5. Породоразрушающий резец [Текст] : пат. 107 277 U1 Рос. Федерация : E21C 35/18.
6. Binner J., Murthy T.S.R.. Structural and Thermostructural Ceramics // *Encycl. Mater. Tech. Ceram. Glas*. 2021. № 1970. P. 3–24.
7. Barrena M.I., Gómez de Salazar J.M., Matesanz L. Interfacial microstructure and mechanical strength of WC–Co/90MnCrV8 cold work tool steel diffusion bonded joint with Cu/Ni electroplated interlayer // *Mater. Des*. Elsevier, 2010. Vol. 31, № 7. P. 3389–3394.
8. Chen G. et al. Investigation on microstructure of electron beam welded WC-Co/40Cr joints // *Vacuum*. Pergamon, 2018. Vol. 149. P. 96–100.
9. Cheniti B. et al. Effect of brazing current on microstructure and mechanical behavior of WC-Co/AISI 1020 steel TIG brazed joint // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*. Elsevier, 2017. Vol. 64. P. 210–218.
10. Yan J.W. et al. Research on the process of infiltration brazed tungsten carbide composite and wear-erode resistance cladding // *2010 Int. Conf. Mech. Autom. Control Eng. MACE2010*. 2010. № 2009. P. 351–353.
11. Zhang X. et al. Brazing of WC–8Co cemented carbide to steel using Cu–Ni–Al alloys as filler metal: Microstructures and joint mechanical behavior // *J.*

- Mater. Sci. Technol. The editorial office of Journal of Materials Science & Technology, 2018. Vol. 34, № 7. P. 1180–1188.
12. Miranda R.M. Joining Cemented Carbides // Comprehensive Hard Materials. Elsevier Ltd, 2014. Vol. 1. 527–538 p.
  13. HASANABADI M. et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of tungsten carbide brazed joints using Ag-Cu-Zn + Ni/Mn filler alloy // Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed. The Nonferrous Metals Society of China, 2017. Vol. 27, № 12. P. 2638–2646.
  14. Резец для горных и дорожных машин [Текст] : пат. 2 643 386 С1 Рос. Федерация : E21С 35/18.
  15. Simões S. Diffusion Bonding and Brazing of Advanced Materials // Metals (Basel). 2018. Vol. 8, № 11. P. 959.
  16. Диффузионная сварка разнородных материалов: учеб.пособие для студ.высш.заведеней/ А.В.Люшинский. - М. : Издательский центр “Академия”, 2006. - 208с. ISBN 5-7695-2294-1.
  17. Резец для горных и дорожных машин [Текст] : пат. 2 643 451 С1 Рос. Федерация : E21С 35/18.
  18. Резец со сменной головкой [Текст] : пат. 106306 U1 Рос. Федерация : E21С 35/18.
  19. Резец со сменной головкой [Текст] : пат. 153412 U1 Рос. Федерация : E21С 35/18.
  20. Upadhyaya G.S. Coatings // Cem. Tungsten Carbides. William Andrew Publishing, 1998. P. 309–344.
  21. Barbatti, C., Garcia, J., Liedl, G., & Pyzalla, A. (2007). Joining of cemented carbides to steel by laser beam welding. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 38(11), 907–914.
  22. Porchilamban S., Amaladas J.R. Structural relationships of metallurgical and mechanical properties influenced by Ni-based fillers on Gas Tungsten Arc Welded Ferritic /Austenitic SS dissimilar joints // J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf. 2019. Vol. 13, № 1. P. 1–22.

23. Brazing Handbook, 5th Edition (AWS). 1991.
24. ГОСТ 17325-79 ПАЙКА И ЛУЖЕНИЕ Основные термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1990.
25. Каталог продукции «Kennametal» [электронный ресурс] –URL: <https://s7d2.scene7.com/s7viewers/html5/eCatalogSearchViewer.html?emailurl=https://s7d2.scene7.com/s7/emailFriend&searchserverurl=http://s7search1.scene7.com/s7search/&serverUrl=https://s7d2.scene7> (дата обращения 20.09.2021) . –Текст: электронный.
26. Каталог продукции ООО «Горный инструмент» [электронный ресурс] – URL: <http://www.grins.ru/products/> (дата обращения 20.09.2021) . –Текст: электронный.
27. Каталог продукции ОАО «КЗТС» [электронный ресурс] –URL: [http://www.kzts.ru/core/user\\_files/Burovoi.pdf](http://www.kzts.ru/core/user_files/Burovoi.pdf) (дата обращения 19.11.2019) . –Текст: электронный.
28. Твердосплавная вставка для породоразрушающего инструмента [Текст] : пат. 2 120 034 С1 Рос. Федерация : E21С 35/18.
29. И.Н. Пашков, В.Е. Мисников, В.А. Морозов, С.А. Таволжанский, Индукционная пайка твердосплавных резцов горного инструмента. Выбор состава и формы припоя. // Сварочное производство, 2021. № 1. С. 66–74.
30. Патент США № 2003/0209366А1,10.2003. Rotatable point-attack bit with protective body / Bruce William McAlvain
31. Инструмент для разрушения минеральных и искусственных материалов [Текст] : пат. 2 092 693 С1 Рос. Федерация : E21С 35/18 (1995.01),E21С 35/183 (1995.01),E21В 10/46 (1995.01).
32. Справочник по пайке / Под ред. И.Е. Петрунина 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003.
33. Klochko, N. A. 1981, Technology of Brazing and Heat Treatment of Hard Alloy Cutting Tools, Moscow: Metallurgia.
34. Electron beam brazing reflow technique. 2017. P. 2017.

35. Chen G. et al. Electron beam hybrid welding-brazing of WC-Co/40Cr dissimilar materials // *Ceram. Int.* Elsevier, 2019. Vol. 45, № 6. P. 7821–7829.
36. Amelzadeh M., Mirsalehi S.E. Dissimilar vacuum brazing of cemented carbide to steel using double-layer filler metals // *J. Manuf. Process.* Elsevier, 2019. Vol. 47, № May. P. 1–9.
37. Zhang X. et al. Brazing of WC–8Co cemented carbide to steel using Cu–Ni–Al alloys as filler metal: Microstructures and joint mechanical behavior // *J. Mater. Sci. Technol.* Elsevier, 2018. Vol. 34, № 7. P. 1180–1188.
38. Penyaz M.A. et al. Overview of nickel-based filler metals for brazing of austenitic stainless steels // *Non-ferrous Met.* 2021. № 9. P. 41–56.
39. Каталог оборудования ООО «Амбит»: [Электронный ресурс]. М., 2011. URL: <https://ambit.pro/katalog>. (Дата обращения: 21.09.2021).
40. Jiang C. et al. Effect of brazing temperature and holding time on joint properties of induction brazed WC-Co/carbon steel using Ag-based alloy // *J. Mater. Process. Technol.* Elsevier B.V., 2016. Vol. 229. P. 562–569.
41. Jiang C. et al. Microstructure and mechanical properties of brazing bonded WC-15Co/35CrMo joint using AgNi/CuZn/AgNi composite interlayers // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* Elsevier Ltd, 2018. Vol. 70. P. 1–8.
42. Braze Solutions LLC.: [Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://brazesolutions.com/>. (Дата обращения: 21.09.2021).
43. Inductoheat, Inc.: [Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://www.inductoheat.com/>. (Дата обращения: 21.09.2021).
44. Novotny P.M., Banerjee M.K. Tool and Die Steels // *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.* Elsevier, 2016.
45. Banerjee M.K. Physical Metallurgy of Tool Steels // *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.* Elsevier, 2018.
46. Mesquita R.A., Barbosa C.A., Machado A.R. 2.9 Heat Treatment of Tool Steels // *Compr. Mater. Finish.* Elsevier, 2017. Vol. 2–3. P. 214–245.
47. ГОСТ 4543-71. Прокат из легированной конструкционной стали.

- Технические условия. - М.: Стандартинформ, 2008.
48. Li C.W. et al. Microstructure characterization of cemented carbide fabricated by selective laser melting process // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* Elsevier, 2018. Vol. 75. P. 225–233.
  49. Kríž A., Bricín D. Properties and Testing of Cemented Carbides // *Powder Metall. - Fundam. Case Stud.* 2017.
  50. Meng R. et al. Improving tribological performance of cemented carbides by combining laser surface texturing and W-S-C solid lubricant coating // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* Elsevier, 2018. Vol. 72. P. 163–171.
  51. Milman Y. V et al. Mechanical properties in bending tests and mechanical behavior of submicron and micron WC-Co grades at elevated temperatures // *Powder Metall. high Perform. Mater. Proc.* Vol. 2 P/M hard Mater. 2001. № January 2001. P. 896.
  52. Kreimer, G. S. (1968). *Strength of hard alloys.* New York, USA: Consultants Bureau.
  53. Каталог продукции Element six LTD. [электронный ресурс] –URL: <https://www.e6.com/en/products/mining-and-construction> (дата обращения 05.10.2021) . –Текст: электронный.
  54. Yuan J. et al. Decarburization mechanisms of WC-Co during thermal spraying: Insights from controlled carbon loss and microstructure characterization // *Mater. Chem. Phys.* Elsevier B.V, 2013. Vol. 142, № 1. P. 165–171.
  55. Limited W.P. *Advances in brazing.*
  56. Panov, V. S., Chuvilin, A. M., & Falkovsky, V. A. (2004). *Technology and properties of sintered cemented carbides and articles thereof.* Moscow, Russian Federation: MISIS.
  57. Konyashin I.Y. *Cemented Carbide Tools* // *Concise Encyclopedia of Self-Propagating High-Temperature Synthesis.* Elsevier Inc., 2017. 54–55 p.
  58. Larsen-Basse, J. (1973). *Wear of hard-metals in rock drilling: a survey of the literature.* *Powder Metallurgy*, 16, 1–31. Lay, S., Hamar-Thibault, S., &

- Lackner, A. (2002). Location of VC in VC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> codoped WC-Co cermets by HRTEM and EELS. *International J.*
59. Beste, U., & Jacobson, S. (2008a). A new view of the deterioration and wear of WC/Co rock drill carbide buttons. *Wear*, 264, 1129–1141.
  60. Beste, U., & Jacobson, S. (2008b). Rock penetration into cemented carbide drill buttons during rock drilling. *Wear*, 264, 1142–1151.
  61. Konyashin I., Ries B., Hlawatschek S. Engineered surfaces on cemented carbides obtained by tailored sintering techniques // *Surf. Coatings Technol.* Elsevier, 2014. Vol. 258. P. 300–309.
  62. J.J. Zhang, Z.Q. Liu J. Du. Modelling and prediction of cutting temperature in the machining of H13 hard steel of multi-layer coated cutting tools Jingjie // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017. Vol. 91 (1–4). P. 49–57.
  63. M'Saoubi R., Ruppel S. Wear and thermal behaviour of CVD  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and MTCVD Ti(C,N) coatings during machining // *CIRP Ann.* Elsevier, 2009. Vol. 58, № 1. P. 57–60.
  64. von Fieandt L. et al. Texture formation in chemical vapor deposition of Ti(C,N) // *J. Cryst. Growth.* North-Holland, 2019. Vol. 508. P. 90–95.
  65. von Fieandt L. et al. On the growth, orientation and hardness of chemical vapor deposited Ti(C,N) // *Thin Solid Films.* Elsevier, 2018. Vol. 645. P. 19–26.
  66. Ruppel S. Advances in chemically vapour deposited wear resistant coatings // *J. Phys.* IV. 2001. Vol. August.
  67. Zhu L. et al. Effect of electroless plating Ni-Cu-P layer on brazability of cemented carbide to steel // *Surf. Coatings Technol.* Elsevier B.V., 2012. Vol. 206, № 8–9. P. 2521–2524.
  68. Yared W. et al. Void distribution in a brazed cemented carbide steel joint analyzed by X-ray microscopy // *Meas. J. Int. Meas. Confed.* Elsevier Ltd, 2019. Vol. 141. P. 250–257.
  69. Пайка металлов / Лашко Н. Ф., Лашко С. В. - М.: Машиностроение, 1977, 328 с.



70. Zhang M. et al. Boron-containing intermetallic compounds in Mn–Cu–Al/430 stainless steel brazed joints formed under a borate brazing flux // Mater. Lett. North-Holland, 2020. Vol. 260. P. 126977.
71. База данных «Springer materials» [электронный ресурс] –URL: <https://www.springer.com/> . –Текст: электронный. (дата обращения 20.09.2021).
72. Craig A. Poland, Noömi Lombaert, Carol Mackie, Alain Renard, Parikhit Sinha, Violaine Verougstraete, Nicky J.J. Lourens, Bioaccessibility as a Determining Factor in the Bioavailability and Toxicokinetics of Cadmium Compounds, Toxicology, 2021.
73. Amelzadeh M., Mirsalehi S. E. Dissimilar joining of WC-Co to steel by low-temperature brazing //Materials Science and Engineering: B. – 2020. – Т. 259. – С. 114597.
74. Jiang W., Gong J., Tu S.T. Effect of brazing temperature on tensile strength and microstructure for a stainless steel plate-fin structure // Mater. Des. 2011. Vol. 32, № 2. P. 736–742.
75. Qin Y., Jiang W. Microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel joints brazed by BNi-7 alloyed with different Cu content. Welding in the World, 2019. P. 1469–1475.
76. Bobzin K., Öte M., Hebing J. Approaches and possibilities for reducing residual stresses in induction brazed cemented carbide/steel joints // Weld. World. Welding in the World, 2020. Vol. 64, № 9. P. 1579–1587.
77. Lavigne O. et al. Characterization of the residual stresses introduced by a new joining method in diamond and tungsten carbide composites // INTERTECH 2019 - Int. Tech. Conf. Diamond, Cubic Boron Nitride Their Appl. Elsevier, 2019. Vol. 85, № May. P. 105051.
78. Upadhyaya G.S. Joining of Cemented Carbides // Cem. Tungsten Carbides. 1998. P. 262–267.
79. Way M. et al. Brazing filler metals. Taylor & Francis, 2020. Vol. 6608.
80. Amirnasiri A., Parvin N., haghshenas M.S. Dissimilar Diffusion Brazing of

- WC-Co to AISI 4145 steel using RBCuZn-D interlayer // J. Manuf. Process. The Society of Manufacturing Engineers, 2017. Vol. 28. P. 82–93.
81. Amelzadeh M., Mirsalehi S.E. Influence of braze type on microstructure and mechanical behavior of WC-Co/steel dissimilar joints // J. Manuf. Process. Elsevier, 2018. Vol. 36, № October. P. 450–458.
82. Upadhyaya G.S. Joining of Cemented Carbides // Cem. Tungsten Carbides. William Andrew Publishing, 1998. P. 262–267.
83. Хорунов В. Ф., Лотоцкий П. Н. Особенности выплавки, структура и свойства никелевых сплавов системы Ni–Mn–Cu // Автоматическая сварка. – 2014.
84. Баженов В. Е. Изучение кристаллизационных процессов тройных сплавов с целью оценки их склонности к неравновесной кристаллизации: дис. – Национальный исследовательский технологический университет, 2013.
85. Чан Ч. Б. Изучение тройных медных сплавов медь–никель–марганец // Изв. Вуз. Цветная металлургия. – 1958. – №. 10. – С. 107-115.
86. Хорунов В.Ф. Основы пайки тонкостенных конструкций из высоколегированных сталей. Киев: Наукова думка, 2008. 242 с. р.
87. Пикунов М.В., Сидоров Е.В. О строении диаграммы состояния системы Cu-Mn-Ni // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 2008. - №5. – с.3 6.
88. Осинцев О. Е., Федоров В. Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник. - М. Машиностроение 2004.
89. Пашков А.И. Исследование и разработка технологии получения сплавов системы Cu - Mn – Ni методом механического легирования для высокотемпературной пайки диссертация: дис. – Национальный исследовательский технологический университет, 2009.
90. Bazhenov V.E. Phase diagram of the Cu-Ni-Mn system // Russ. J. Non-Ferrous Met. 2013. Vol. 54, № 2. P. 171–177.
91. Pashkov A.I., Gerasimov S.P., Pashkov I.N. Melting and gap filling behavior of mechanically alloyed and cast Cu-Mn-Ni brazing metals // Russ. J. Non-

- Ferrous Met. 2011. Vol. 52, № 6. P. 496–498.
92. Lahiri A., Banerjee T. Studies on the properties of some copper-manganese alloys. 2019. № April 1966.
  93. Шейн Ю. Ф., Сторчай Е. И., Соколова А. В. Выбор припоя для узлов криогенной техники их стали 12Х18НТ10 // Повышение эффективности производства паяных конструкция.– М.: МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1983.– С. 112-117.
  94. Понимаш И.Д., Орлов А.В., Рыбкин Б.В., Вакуумная пайка реакторных материалов. - М.: Энергоатомиздат, 1995. - 192с.
  95. ГОСТ 5632-2014. Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные марки. - М.: Стандартиформ, 2014
  96. Гост 3882-74. Сплавы твердые спеченные Марки. - М.: Стандартиформ, 2008
  97. ГОСТ 23904-79. Пайка. Метод определения смачивания материалов припоями. - М.: Издательство стандартов, 1982
  98. ЛОМО микросистемы.: [Электронный ресурс]. 2021.  
URL:<https://www.lomo-microsystems.ru/Metam-RV21.html/>. (Дата обращения: 21.09.2021).
  99. Tescan.: [Электронный ресурс]. 2021.  
URL:<https://tescan.ru/product/skaniruyushchie-elektronnye-mikroskopy/tescan-vega/>. (Дата обращения: 21.09.2021).
  100. Neikov O.D. Atomization and Granulation // Handbook of Non-Ferrous Metal Powders. 2nd ed. Elsevier Ltd., 2019. 125–185 p.
  101. Kemmitt R.D.W. Manganese // Chem. Manganese, Technetium Rhenium. Pergamon, 1973. P. 771–876.