

На правах рукописи



Мисников Валерий Евгеньевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ
ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ РЕЗЦОВ ГОРНЫХ МАШИН ПРИПОЯМИ НА ОСНОВЕ
ПОРОШКОВ СПЛАВОВ Cu-Mn-Ni**

Специальность 2.5.8. – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2022 г.

Работа выполнена на кафедре «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: - **Пашков Игорь Николаевич**,
доктор технических наук, ФГБОУ ВО
«Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)», г. Москва

Официальные оппоненты: - **Овчинников Виктор Васильевич**,
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой материаловедения ФГАУ ВО «Московский
политехнический университет», г. Москва
- **Люшинский Анатолий Владимирович**,
доктор технических наук, профессор, АО «Раменское
приборостроительное конструкторское бюро»,
заведующий научно-исследовательской лабораторией,
г. Раменское

Ведущая организация: - ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный
университет», г. Тольятти

Защита диссертации состоится 14 декабря 2022 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.05 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, ул. Оршанская, д.3, аудитория 523А.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета и по электронной почте paltievichar@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=168557

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
24.2.327.05, к.т.н., доцент



Палтиеви́ч А.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Горнодобывающая отрасль расширяется стремительными темпами и требует от тангенциальных резцов, являющихся породоразрушающим инструментом, используемым при добыче полезных ископаемых, все большего увеличения глубины выработки. Резцы состоят из двух основных частей, соединяемых высокотемпературной пайкой: стального корпуса и твердосплавной режущей части, обеспечивающей функциональные свойства. Увеличение эксплуатационного ресурса инструмента может быть достигнуто за счет роста предела прочности паяных соединений сталь / WC-Co.

В качестве присадочного материала используются сплавы систем Cu-Zn, и Cu-Mn-Ni(Co). Использование этих сплавов обосновано совмещением процессов пайки и закалки на конвейерных линиях изготовления резцов. Температура закалки высоколегированных сталей, используемых при изготовлении корпусов, превышает 820 °С, что сужает количество применимых припоев, обладающих соответствующей температурой солидуса. 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).

В то время как за рубежом, при изготовлении тяжелонагруженных тангенциальных резцов применяют сплавы Cu-Mn-Ni(Co), на территории Российской Федерации отсутствует масштабное производство таких припоев 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 тангенциальных резцов небольшими партиями. Большое количество типоразмеров инструмента требует такого же большого количества 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, посвященных твердосплавному инструменту, является либо улучшение механических и абразивных свойств самих твердых сплавов, либо изучение механических свойств паяных соединений сталь\твердый сплав, паяных компактными припоями Cu-Zn. В литературных источниках практически отсутствуют сведения о влиянии состава припоев системы Cu-Mn-Ni(Co) и температурно-временных режимов пайки на получаемую микроструктуру и ее связь с механическими свойствами соединений сталь/ твердый сплав.

В связи со всем вышеизложенным, наибольший интерес представляет применение высокопрочных сплавов Cu-Mn-Ni(Co) в порошковой форме для соединения твердосплавных вставок со стальными корпусами горного инструмента, а также установление зависимостей структурно-фазового состояния и механических свойств паяных соединений сталь\ WC-Co от элементного состава сплава-припоя Cu-Mn-Ni(Co).

Цель исследования – 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 необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ составов и видов припоев, применяемых для пайки резцов горной техники;
2. Изучить влияние температурно-временных параметров процесса пайки и химических составов припоев на формирование микроструктуры соединений;
3. Исследовать влияние нанесения металлических покрытий на формирование структурно-фазового состояния паяных швов сталь/твердый сплав;
4. Разработать методику определения механической прочности паяных соединений сталь/твердый сплав и изучить зависимости механической прочности паяных соединений на срез от химического состава припоя и температурно-временных параметров процесса пайки
5. Изучить динамику плавления и заполнения зазоров при использовании порошковых паяльных смесей и разработать технологию пайки тангенциальных крупногабаритных резцов на автоматической конвейерной линии при помощи этих смесей.

Научная новизна:

1. 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 γ - Cu(Ni,Mn,Fe,Co) и твердого раствора α - Fe-Co. Выявлено, что количество α -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 α -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.
2. 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.
3. 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/ВК8 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;

Степень достоверности результатов научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, определяется использованием контрольно-измерительной аппаратуры и применением физико-химических методов исследования (световая микроскопия, растровая электронная микроскопия, микрорентгеноспектральный анализ); результатами опытно-промышленной проверки и апробацией результатов диссертационной работы на предприятии, производящем материалы для пайки и предприятии, занимающимся серийным выпуском горнопроходческого инструмента.

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, 5 в сборниках трудов научных конференций.

Структура и объем работы

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, затем сформулирована цель, показана ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе, проведен анализ конструктивно-технологических особенностей, касающихся разработки и производства тангенциальных резцов. Исследованы конструкции паяных соединений горного инструмента, материалы и оборудование, применяемое при их изготовлении. На основании данных литературного обзора обнаружены три системы сплавов, применяемые при пайке горнопроходческого инструмента: Cu-Zn, Ag-Cu-Zn и Cu-Mn-Ni(Co). Выявлены достоинства и недостатки каждой системы. В частности, показано, что лидирующие зарубежные предприятия при изготовлении тяжело нагруженных резцов применяют прокат из сплавов Cu-Mn-Ni(Co), в то время как на территории РФ используются менее прочные сплавы Cu-Zn.

Во второй главе описаны материалы и методы исследования, примененные в работе. Выбраны 5 составов припоев, находящихся в медном угле диаграммы состояния (таблица 1) и имеющие температуру солидус выше, чем температура закалки у исследуемой стали, что позволяет совмещать пайку и термообработку. В качестве основного материала использованы стали 30ХГСА с температурой закалки 880 °С, 12Х18Н10Т и твердый сплав ВК8. Описана технология выплавки экспериментальных сплавов. Для оценки влияния покрытий на формирование-структурно-фазового состояния на твердый сплав наносили Ni, Cu, Ti, Cr, Al с помощью вакуумного магнетронного распыления. Толщина слоя нанесенного металла составляла 0,2-0,4 мкм.

Таблица 1 – Химический состав и температурные характеристики экспериментальных сплавов

№ сплава, п.п.	Химический состав, мас. %				Tsol, °С	Tliq, °С
	Cu	Mn	Ni	Co		
1	67,6	23,1	9,3	-	910	955
2	71,8	22,9	5,1	-	900	923
3	80,3	14,8	5	-	927	988
4	69	25,6	-	5,4	897	972
5	68,8	24,9	3,3	3	886	919

Описаны и обоснованы температурно-временные режимы пайки. Для демонстрации влияния длительности и скорости термического цикла на микроструктуру и механические свойства выбраны технологии вакуумной и индукционной пайки. Описаны конструкции образцов и процесс пайки.

Описаны макетные образцы для исследования процессов, протекающих при пайке тупиковых соединений порошковыми смесями. Выбраны три флюса с разными теплофизическими характеристиками и действующими веществами: ФК260(температурный интервал активности 750-1100 °С, активное вещество NaBF_4), ФК250(температурный интервал активности 550-950 °С, активное вещество KBF_4), ПВ200(температурный интервал активности 850-1250 °С, активное вещество $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) для определения влияния состава и содержания флюса на пористость в соединении. Варьирование концентрации флюса в порошковой паяльной смеси производилось от 4 до 18 % с шагом 2%.

В третьей главе изложены результаты исследований по формированию структурно-фазового состояния паяных соединений сталь/твердый сплав. Приведены результаты исследований микроструктуры соединений в зависимости от режимов пайки, составов припоя и стали. Приведены данные по микрорентгеноспектральному анализу фаз, формируемых в соединениях и карты распределения элементов в паяных швах. Представлены результаты по влиянию металлических покрытий на формирование структурно-фазового состояния, а также на процессы смачивания и растекания припоя по покрытой поверхности.

Микроструктура паяного шва, формируемая припоями Cu-Mn-Ni, идентична микроструктуре на сплавах Cu-Mn-Co и имеет двухфазный вид: зона №1 паяного шва, состоящего из твердого раствора Cu(Mn,Ni,Fe). Область 1 на рисунке 1; зона №2, являющаяся твердым раствором на основе железа Fe-Co(Mn,Ni). Область 2 на рисунке 1.

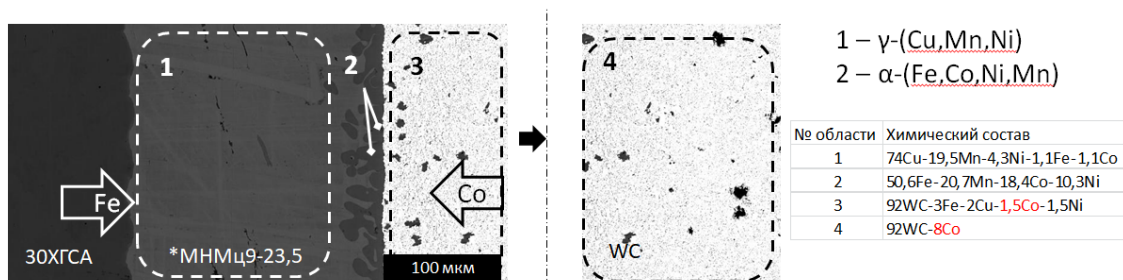


Рисунок 1 - Микроструктура образцов 30XГСА/ВК8, паяных в вакууме припоем МНМц5-23,5 при температуре 1020 °С с временем выдержки 20 мин

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.

Исходя из данных, представленных в таблице 2 можно заключить, что решающим фактором в формировании состава железо-кобальтовой фазы является состав припоя. Видно, что при легировании припоя кобальтом, увеличивается доля последнего в фазе Fe-Co.

Таблица 2 – Элементный состав Fe-Co 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

При этом важно отметить, что исходя из анализа микроструктур, количество Fe-Co фазы увеличивается с ростом температуры и времени пайки наряду с изменением в ней концентрации кобальта.

В ходе исследований впервые было обнаружено, что в области контакта твердого сплава с расплавом припоя формируется зона, обедненная по кобальту (рисунок 1 спектр 3, граница обозначена красной линией). На границе контакта происходит встречная диффузия, в результате которой, кобальт из твердого сплава движется в область паяного шва, а элементы припоя (медь, марганец и никель) движутся в твердый сплав, частично замещая при этом кобальт в зоне взаимодействия замещая тем самым кобальт. Важно отметить, что концентрация кобальта в твердом сплаве на границе измененной и неизменной зоны изменяется скачкообразно, как показано на рисунке 2.

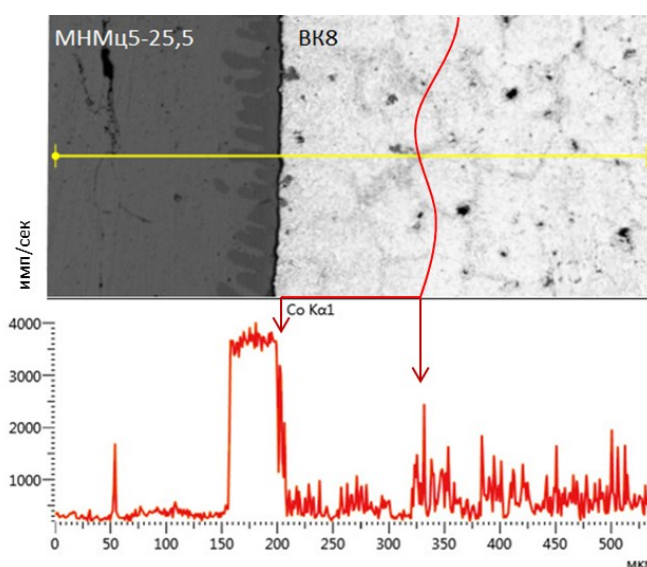


Рисунок 2 – Изменение концентрации кобальта на границе зоны диффузионного взаимодействия в твердом сплаве

При увеличении температуры пайки происходит изменение размера области диффузионного взаимодействия твердого сплава, в которой уменьшено содержание кобальта. Это показано на рисунке 3.

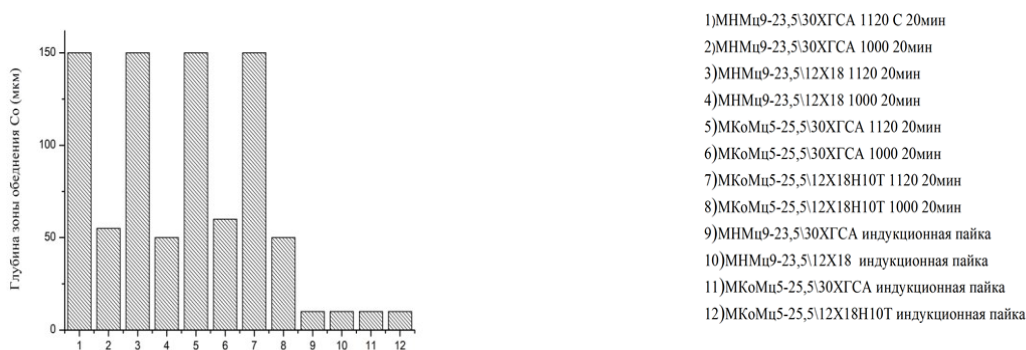
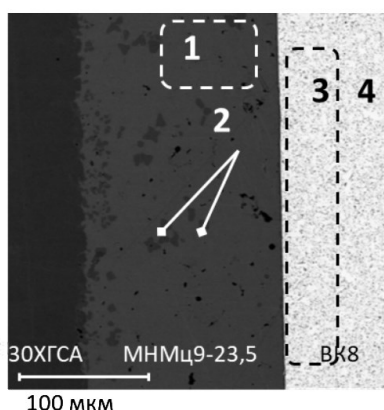


Рисунок 3 – Зависимость глубины зоны обеднения твердого сплава по Co при пайке припоями Cu-Mn-Ni и Cu-Mn-Co

Исходя их данных на рисунке 3 видно, что температурно-временные параметры процесса непосредственным образом влияют на ширину обедненной зоны по кобальту. Увеличение температуры пайки с 1000 до 1120 °C 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 (образцы 9-12) и снижением общего количества фазы (Fe-Co-Ni-Mn-Cu), что в свою очередь отображено на рисунке 4.



№ 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 4 – Микроструктура соединения 12X18H10Т/ВК8, 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 Fe-Co фазы происходит от поверхности твердого сплава (рисунок 1).

В условиях индукционной пайки: быстрого нагрева и быстрого охлаждения образца, зерна железо-кобальтовой фазы кристаллизуются по всему объему паяного шва. Это явление изображено на рисунке 4.

Основная роль тонких металлических покрытий состоит в изменении поверхностного натяжения расплава припоя при контакте с покрытием, не влияя на глубину обеднения по кобальту на границе припой-твердый сплав. Поэтому, применение покрытий из металлов, входящих в состав припоя улучшают технологические свойства процесса путем повышения адгезии припоя к твердому сплаву. В работе было 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°. Минимальный угол смачивания получен на Ni покрытии и составляет 6°. На покрытия Al, Cr и Ti для получения угла смачивания меньше 10° нужны высокие температуры, свыше 1200 °C.

Таким образом, в ходе металлографических исследований было выявлено, что в ходе пайки сталей с твердыми сплавами припоями Cu-Mn-Ni происходит ряд явлений, которые могут оказывать влияние на механические свойства:

1. образование Fe-Co фазы, на механизм кристаллизации которой влияют кинетические параметры процесса пайки;
2. образование зоны диффузионного взаимодействия с уменьшенной концентрацией кобальта в твердом сплаве.

В четвертой главе описаны имеющиеся в мировой практике методики для испытаний соединений сталь-твердый сплав (рисунок 5). Проведен анализ механической прочности на срез по разработанной методике. Определена корреляция механических свойств с микроструктурой паяных соединений.

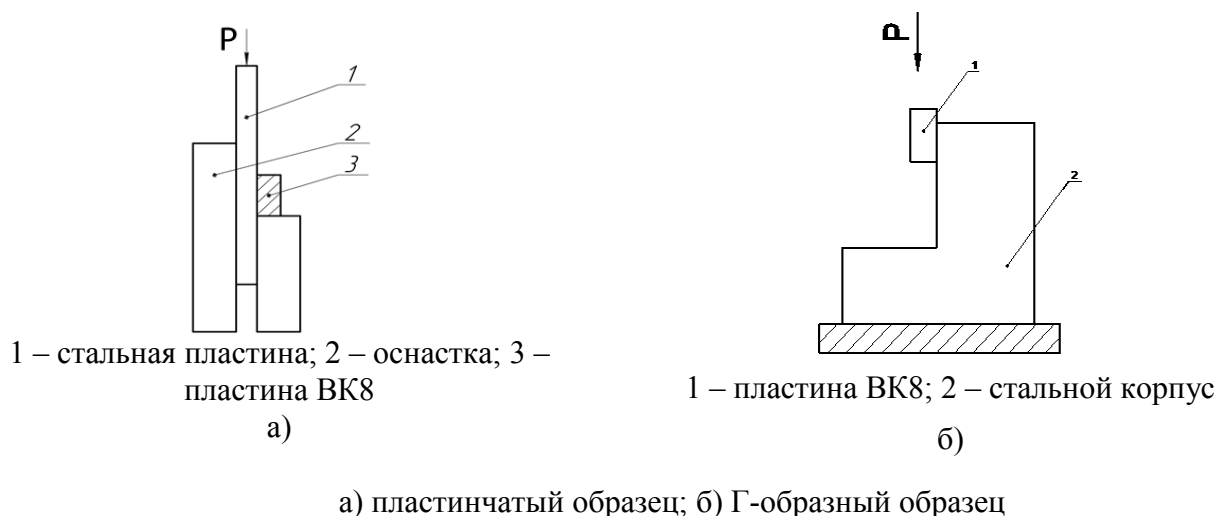


Рисунок 5 – Известные схемы испытания на срез разнородных соединений

В работе показано, что при применении уже известных методик к паяным соединениям с механической прочностью на срез превышающей 400 МПа, дает разрушение по твердому сплаву, а относительная погрешность в значениях прочности на срез может достигать 30%.

В результате образования малейшей несоосности приложения нагрузки P , при испытании высокопрочных соединений возникают изгибающие напряжения, приводящие к разрушению по твердому сплаву. Такое разрушение не позволяет оценить прочность паяного соединения.

В результате, в ходе работы была разработана конструкция образцов и схема испытаний, исключающая влияние изгибающих напряжений, представленная на рисунке 6.

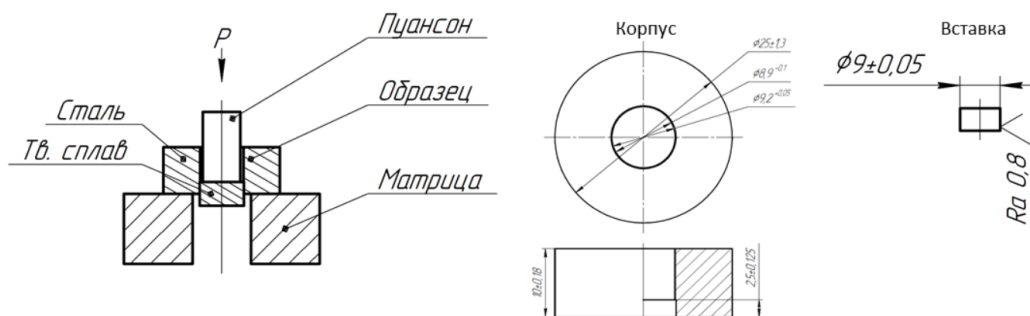
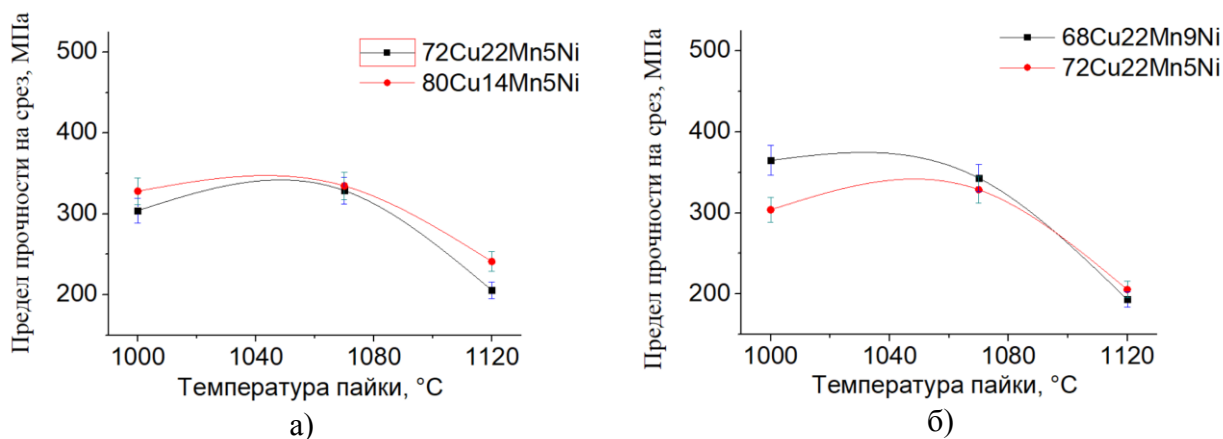


Рисунок 6 – Схема испытаний и конструкция образца, разработанная в ходе работы

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 на срез.

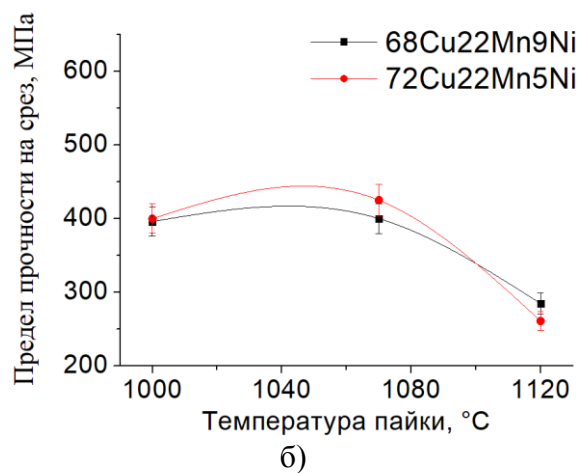
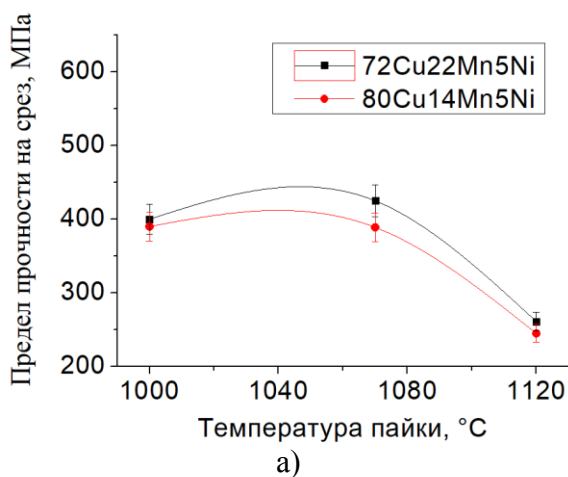
Наибольший вклад в изменение механических свойств вносят температурно-временные параметры процесса. При увеличении температуры пайки наблюдается разупрочнение паяного шва, связанное с изменением уходом концентрации Mn за предел исследуемой области концентраций

Влияние состава припоя на предел прочности при испытаниях на срез можно оценить по данным, изображенным на рисунках 7-9.



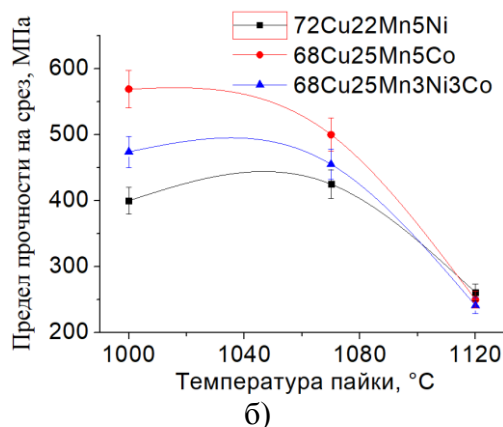
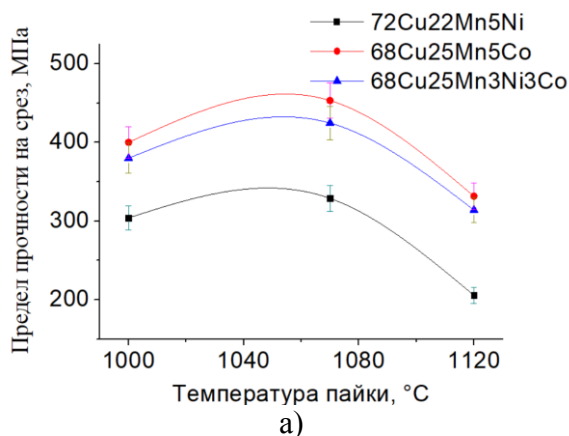
а) Mn; б) Ni

Рисунок 7 – Влияние легирующих элементов в припое на предел прочности при испытаниях на срез соединений 12X18H10T/ВК8 в зависимости от температуры пайки



а) Mn; б) Ni

Рисунок 8 – Влияние легирующих элементов в припое на предел прочности при испытаниях на срез соединений 30XГСА/ВК8 в зависимости от температуры пайки



а) сталь 12X18N10T; б) сталь 30XГСА

Рисунок 9 – Влияние кобальта на предел прочности при испытаниях на срез в зависимости от температуры пайки

Исходя из графиков, изображенных на рисунках 8-10 наибольшее влияние на механические характеристики вносит температурные параметры процесса. На деградацию предела прочности при увеличении температуры пайки влияют следующие факторы:

1. Увеличение температуры пайки предположительно ведет к увеличению остаточных паяльных напряжений после охлаждения образцов;
2. С ростом температуры пайки происходит изменение химического состава паяного шва. С ростом температуры пайки с 1070 до 1120 °C марганец меняет свою концентрацию, выходя за пределы исследуемой области.

Установлено влияние технологии нагрева и охлаждения на механические характеристики паяных соединений. При использовании индукционного метода нагрева с быстрым (порядка

100 °C/с) относительно пайки в вакууме (20 °C/мин) охлаждением на воздухе (скорость охлаждения порядка 100 °C/с) происходит упрочнение соединения, за счет диспергирования железо-кобальтовой фазы по всему объему паяного шва (рисунок 4). За счет данного эффекта предел прочности на срез растет на величину до 30%, что иллюстрируется рисунком 10.

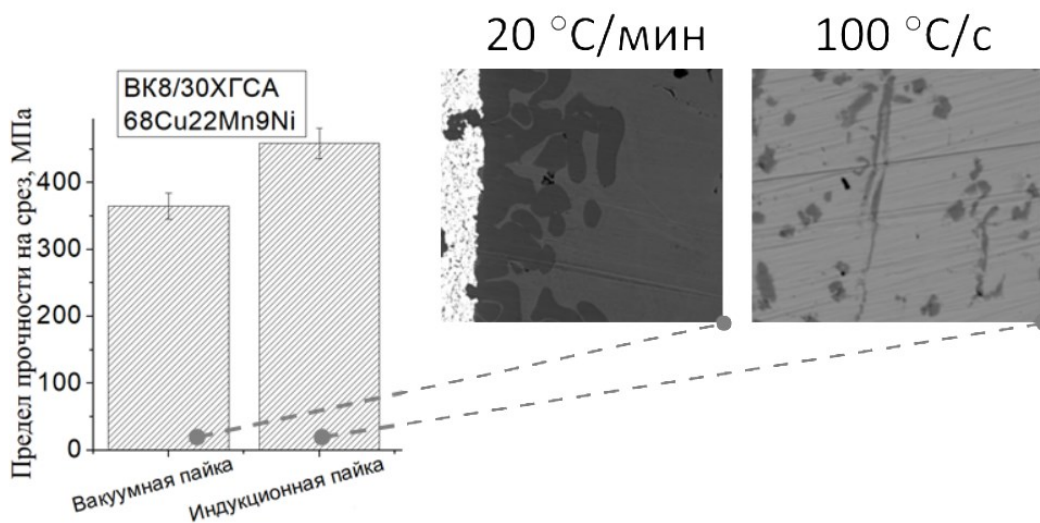


Рисунок 10 – Влияние скорости охлаждения на предел прочности на срез

В пятой главе проводилось исследование процессов проходящих при плавлении порошковых паяльных смесей и заполнении ими зазоров в тупиковых соединениях. Изучалось влияние распределения теплового поля в образце на динамику плавления припоя. Рассматривалось влияние химического состава и количества флюса на пористость в тупиковых соединениях тангенциальных резцов. 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 резцов.

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.

На рисунке 11 показаны зависимости насыпной плотности, и высоты заполнения технологического отверстия от содержания флюса в паяльной смеси.

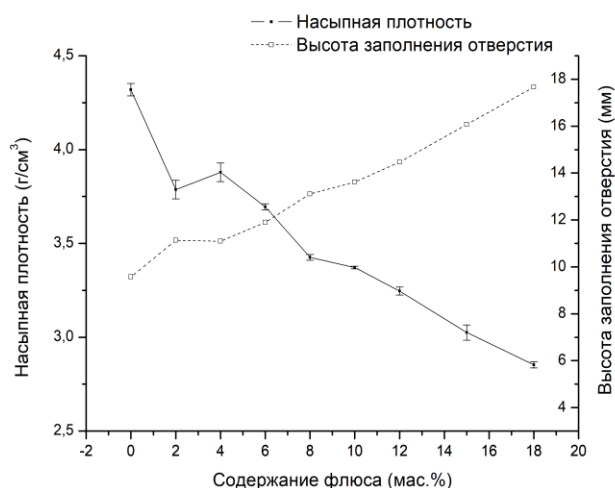


Рисунок 11 – Зависимость высоты заполнения паяльной смесью технологического паза от насыпной плотности для отверстия 20мм

По рисунку видно, что при снижении насыпной плотности паяльной смеси за счет увеличения в ней содержания флюса, происходит линейный рост объема, занимаемого засыпкой в корпусе резца. Это означает, что при увеличении в концентрации паяльной смеси флюса, вставка, размещаемая в технологическое отверстие на корпусе резца, будет открывать доступ для дополнительного кислорода в соединение до того момента как произойдет расплавление порошка припоя. На рисунке 12 показано влияние содержания флюса на удельную пористость.

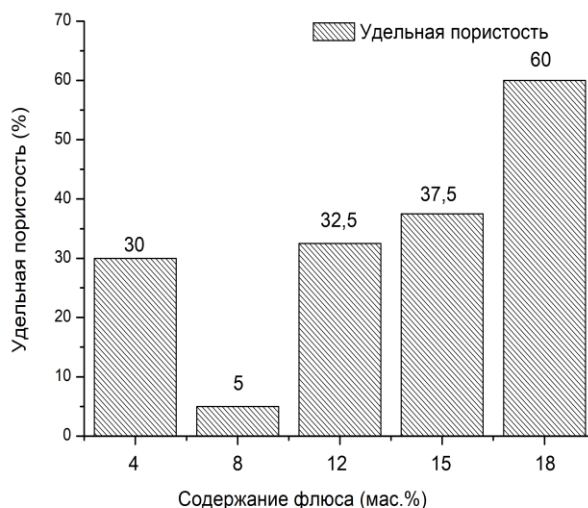


Рисунок 12 – Зависимость удельной пористости в тупиковых соединениях от содержания флюса в паяльной смеси

Согласно данным на рисунке 12 в цилиндрических соединениях 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.

На основании полученных данных, стало понятно, что для пайки тангенциальных резцов наилучшей является смесь с содержанием 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 вышеперечисленных, 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 13

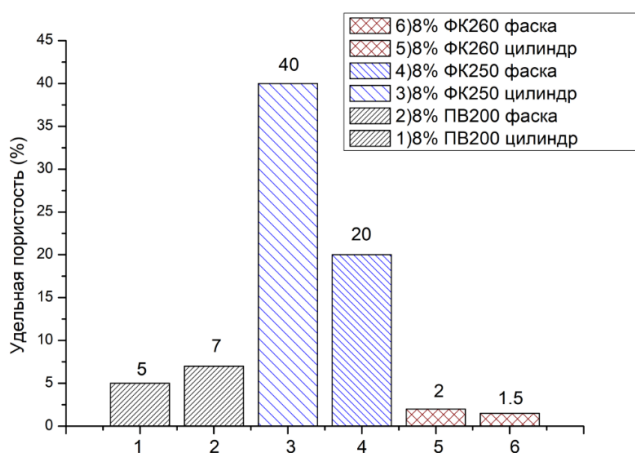


Рисунок 13 – Зависимость удельной пористости в тупиковых соединениях от химического состава флюса в паяльной смеси

Как видно, по данным на рисунке 13, при использовании флюса ФК250 в соединении образуется большое количество пор. Наименьшее количество пор (2,5%) образуется при использовании флюса ПВ200 и флюса ФК260. Однако, при использовании ПВ200 на поверхности галтели образуются тугоплавкие шлаки, приводящие к возникновению дефектов (после галтовки образцов, на месте шлаков в галтели проявляются раковины и поры). А Итогом

эксперимента стало принятие решения об использовании 8 мас.% флюса, содержащего борный ангидрид и фторборат натрия в паяльных смесях для пайки тупиковых соединений горного инструмента.

Немаловажным фактором, влияющим на порообразование в тупиковом паяном шве, является механизм плавления, смачивания и растекания припоя. В работе было установлено ключевое отличие компактных припоев от порошковых смесей, влияющее на образование пористости при применении порошков. 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 потока расплава при его течении препятствуют силы когезии. Порошковая система отличается тем, что из-за плохого теплового контакта между частицами плавление порошковой дозы припоя происходит в среднем в 2 раза дольше, чем той же массы компактного припоя. При наличии перегретой 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 основной частью порошкового закладного элемента и уже расплавившейся дозой материала. Если верхняя часть корпуса разогревается быстрее сердцевины, то порошковый припой склонен к быстрому подъему к верхней кромке и образованию кольцевой галтели. Образовавшиеся в таком случае воздушные разрывы между расплавом и порошком будут являться местами торможения выхода газообразных и шлаковых продуктов взаимодействия флюса с поверхностью материала. Описанный механизм образования пор иллюстрируется рисунком 14.

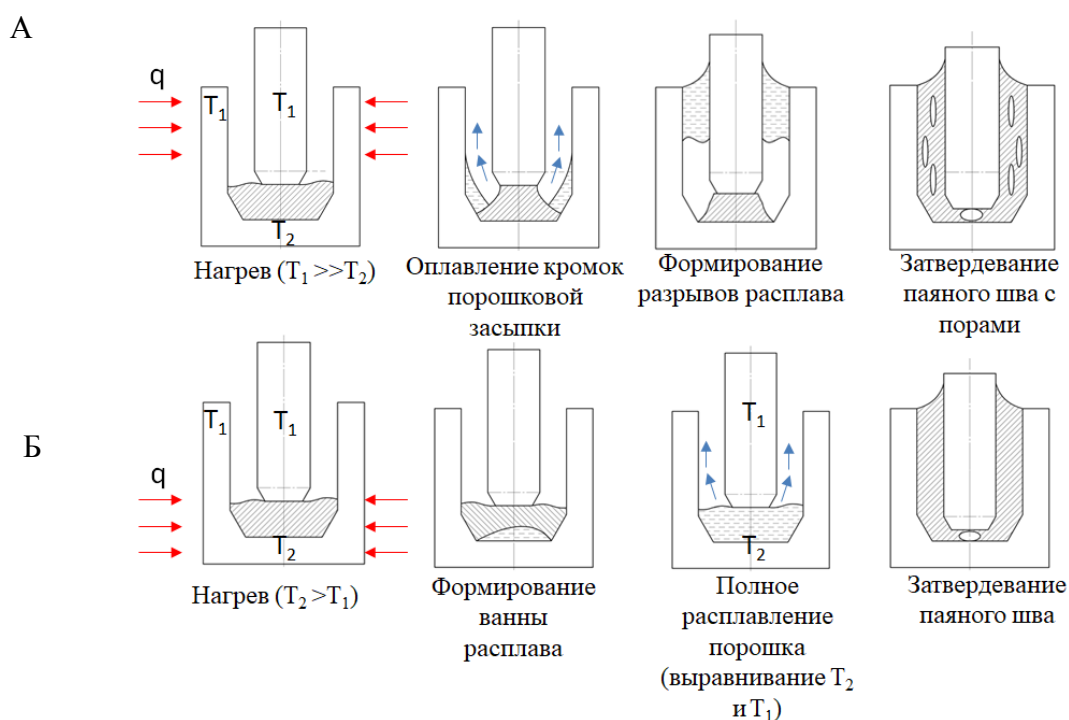


Рисунок 14 – Механизм образования пористости в соединении

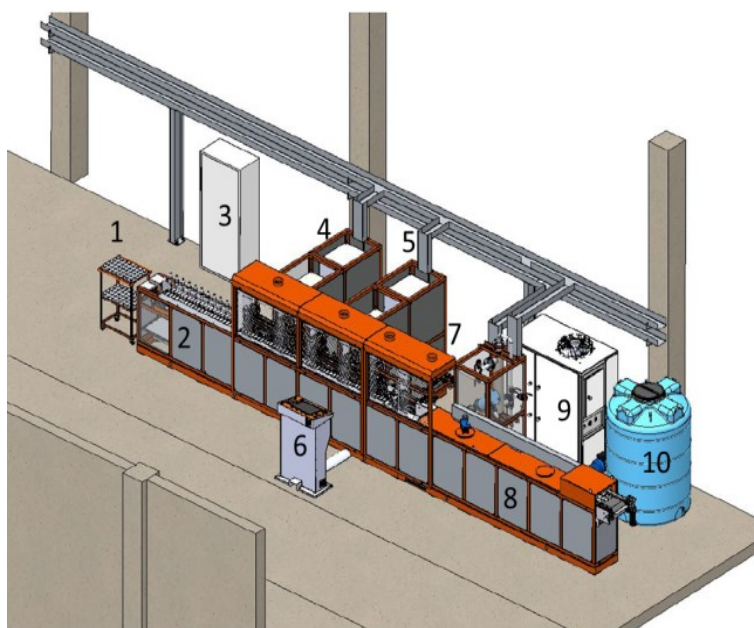
Проблема образования разрывов расплава и формирования закрытой пористости частично решается при формировании в образце теплового поля, по схеме, показанной на рисунке 14 Б. При таком разогреве в донной части корпуса изделия образуется тепловой замок, препятствующий стоку тепла. Наиболее горячая зона 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, формируя на дне корпуса ванну расплава, которая в свою очередь разогревает твердосплавную вставку. 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.

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

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 распределения железо-кобальтовой фазы по всему объему паяного шва 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 тангенциальных 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 15.



1 – участок дозирования смеси и сборки резцов; 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 15 – Общий вид конвейерной линии для пайки тангенциальных 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 г, а диаметр вставки от 15 до 24 мм. Юстировочные параметры, подбирались путем пирометрического контроля равномерности нагрева заготовок. В индукторе 1 обеспечивалась схема нагрева, описанная в главе 5, заключающаяся в косвенном нагреве твердого сплава за счет теплопередачи от расплавленного порошкового припоя. В индукторе 2 обеспечивался равномерный разогрев всего изделия до закалочной температуры.

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 тангенциальных резцов состоит из четырех этапов:

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.

Дозирование припоя осуществляется объемным дозатором 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 экспериментальным путем. При недостаточной концентрации флюса происходило окисление галтели (рисунок 16 в). При чрезмерной концентрации флюсующей суспензии в галтели образовывались раковины (рисунок 16 а). На рисунке 16 б) представлен бездефектный резец, паяный с использованием суспензии флюса оптимальной концентрации.



а)

б)

в)

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

Рисунок 16 – 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.

При запуске процесса пайки вначале конвейера устанавливались образцы-болванки 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 заполнения 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.

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 3).

Таблица 3 – 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°. Минимальный угол смачивания получен на Ni покрытиях и составляет 6°. На покрытия Al, Cr и Ti для получения угла смачивания меньше 10° нужны высокие температуры, свыше 1200 °С.
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 °С до 1020 °С.
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 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикация в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. V. E. Misnikov, T. A. Bazlova, I. N. Pashkov, Investigation of adhesion and diffusion activity of Cu – Mn – Ni brazing filler metal with WC – 8Co cemented carbide // *Non-ferrous Metals*, – 2021. –V. 3 – P. 33-38.
2. И.Н. Пашков, В.Е. Мисников, В.А. Морозов, Т.А. Базлова, Влияние состава припоя и флюса на термическую стабильность паяных PDC резцов. // *Сварочное производство*, 2021. № 1. С. 44–50.

I. N. Pashkov, V. E. Misnikov, V. A. Morozov, M. Gadzhiev & T. A. Bazlova (2021) Influence of solder and flux composition on thermal stability of brazed PDC cutters, *Welding International*, 35:1-3, 121-126, DOI: 10.1080/09507116.2021.1963535 (Переводная версия, индексировано в Scopus)

3. 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*, 2020. № 8. С. 20–27.

I.N Pashkov, V.E Misnikov, V.A Morozov & S.A Tavolzhanskiy (2019) Induction brazing of carbide cutters for a mining tool. The choice of composition and solder form, *Welding International*, 33:10-12, 411-417, DOI: 10.1080/09507116.2021.1894032 (Переводная версия, индексировано в Scopus)

Материалы конференций:

4. Пашков И.Н., Мисников В.Е., Базлова Т.А., Купсольцева О.А. Взаимодействие расплава Cu-Mn-Ni припоя с поверхностью твердого сплава. В сборнике: «Быстрозакаленные материалы и покрытия». XVII-ая Международная научно-техническая конференция. Москва, 2020. С. 385-388.

5. Пашков И.Н., Мисников В.Е., Базлова Т.А., Купсольцева О.А. Влияние покрытий на взаимодействие расплава припоя на основе системы медь-марганец-никель с твердым сплавом. В сборнике: «Прогрессивные литейные технологии». Труды X Международной научно-технической конференции. Москва, 2020. С. 234-238.

6. Misnikov V.E, Pashkov I.N., Bazlova T.A., Bazhenov V.E. Brazing cemented carbide with steel using Cu-Mn-Ni filler metal. В сборнике: «12th International Conference on Brazing, High Temperature Brazing and Diffusion Bonding». XII Международная научно-техническая конференция. Аахен, 2019. С. 26 – 32.

7. Мисников В.Е. Пайка кермета с углеродистой сталью припоем Cu-Mn-Ni. В сборнике: 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019 Тезисы: М.: МАИ., 2019. С. 235.

8. Пашков И.Н, Мисников В.Е., Базлова Т.А., Баженов В.Е. Изучение морфологии структуры паяных соединений 30ХГСА/МНМц 9-23,5, полученных методом индукционной пайки. В сборнике: «Быстрозакаленные материалы и покрытия». XV Международная научно-техническая конференция. Москва, 2018. С. 307 – 310.