

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(Наименование института)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(Наименование кафедры)

15.04.01 «Машиностроение»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

«Технология и оборудование для пайки»

(направленность (профиль))

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему «Исследование процессов формирования структуры и свойств паяных соединений из хромо – никелевых сплавов»

Студент(ка)

С.А.Седых

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

О.В.Шашкин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

В.Г. Виткалов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., профессор Б.Н. Перевезенцев

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой СОМДиРП д.т.н., профессор В.В. Ельцов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ г.

Тольятти 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Общие сведения.....	5
1.1. Описание конструкции изделия и условий его эксплуатации .....	5
1.2. Технология изготовления изделия .....	6
1.3. Основные сведения о никеле и его сплавах.....	17
2 Анализ и выбор способа соединения.....	28
2.1. Сварка.....	28
2.2. Пайка .....	33
2.3. Особенности пайки высоколегированных сплавов .....	46
3 Методика проведения и результаты экспериментов .....	61
3.1. Особенности формирования структуры и свойств паяных соединений, выполненных припоем ПЖК-1000.....	63
3.2. Особенности формирования структуры и свойств паяных соединений, выполненных припоем ВПр51 .....	72
4 Анализ результатов и технические рекомендации .....	78
Заключение.....	80
Список использованных источников .....	82

## ВВЕДЕНИЕ

Для производств химической продукции огромной мощности преимущественное распространение составили многорядные прямоточные печи с верхним пламенным обогревом. Такая печь максимальное обязательное оборудование на любом химическом предприятии для производства таких продуктов как аммиак, сероводород и метанола.

Реакционная часть промышленных печей для реализации процесса парового риформинга рассчитана на то, чтобы получить конвертированный газ из смеси водяного пара под давлением и природного газа в обогреваемых реакционных трубах. Данная реакционная система печи может быть использована, как при модернизации и усовершенствования старых установок риформинга, так и при строительстве современных высокопроизводительных установок для производства аммиака и других газов.

Печь состоит из двух секций, радиационной и конвекционной со встроенным вспомогательным котлом. В радиационных камерах расположены реакционные трубы, по 213 штуки в каждой. Трубы параллельно размещены в два вертикальных ряда. Смесь водяного пара и газа из входного коллектора равномерно разделяется между всеми вертикально расположенными реакционными трубами.

Секция, в которой происходит реакция риформинга, состоит из труб, которые соединены при помощи сварки между собой. Реакционные трубы – главная часть всех установок по производству получения продуктов нефтехимии.

Трубные заготовки, которые рассчитаны для создания змеевиков трубчатых печей, производят из высоколегированного жаропрочного и коррозионно- стойкого хромо – никелевого сплава методом центробежного литья.

Продолжительность работы реакционных труб на агрегатах аммиака и метанола, которые работают при высоких температурах в агрессивных средах,

составляет от 20000 до 65000 часов. После окончания срока службы реакционные секции меняют, из – за того, что быстро снижается прочность металла. А это нередко влечет к аварийной поломке трубы и выходу из строя всей установки.

Хромо-никелевые сплавы характеризуются очень высокой химической стойкостью. Поэтому совсем недавно они приобрели массовое увеличение потребление в различных отраслях химической промышленности. Металлические сплавы, в основе которых лежит никель, и содержащие большое количество легирующих элементов, наряду с очень высокой жаропрочностью и стойкостью против окисления при высоких температурах характеризуются и весьма высокой стойкостью против действия коррозии применительно к большинству агрессивных сред (газовые, соляные и жидкометаллические).

Специфика соединения хромо-никелевых сплавов определяется, прежде всего, свойствами и особенностями формирования соединений жаропрочных и коррозионно-стойких сталей.

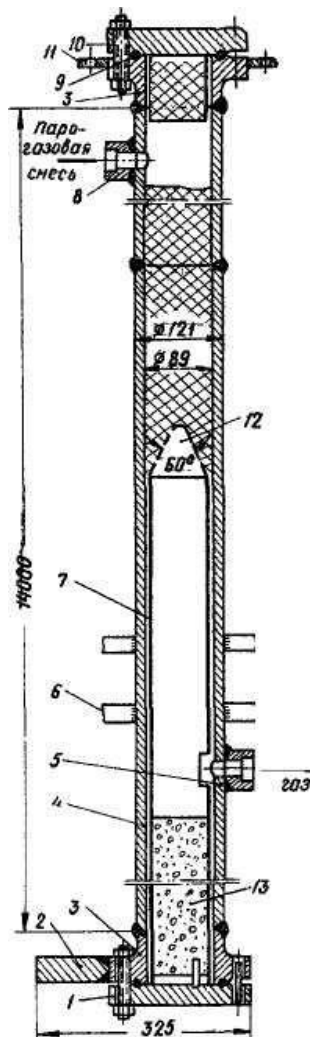
Используемая в настоящее время технология соединения с помощью ручной аргонодуговой сварки на сегодняшний день самая применяемая, но обладающая рядом недостатков: учитывая особенности конструкции она является очень трудоемкой (высокие требования к квалификации сварщика, низкая производительность) и не обеспечивающей необходимого качества сварных соединений и, как следствие, характеризующаяся значительными расходами на исправление дефектов.

Цель проекта заключается в улучшении качества соединения изготовленных элементов для реакционной секции, путем замены способа соединения.

## 1 Общие сведения

### 1.1 Описание конструкции изделия и условий его эксплуатации

Отдельно взятая труба реакционная является единичным реактором, в котором в присутствии катализатора происходит химическая реакция и возникает связь паров воды и конкретного углеводорода при помощи подводимого через стенку трубы тепла. В химической промышленности применяются реакционные трубы (рис. 1.1) самых разных конструкций [45].



- 1 – крышка нижняя; 2 – стержень опорный; 3 – фланец; 4 – корпус трубы;  
5 – бобышка к газоотводящей трубке; 6 – планки для распределителей  
(сепараторов) трубного экрана; 7 – стакан опорный решетки катализаторной;  
8 – бобышка к газоподводящей трубке; 9 – кольца уплотняющие; 10 – крышка  
верхняя; 11 – серьги для подвески реакционной трубы;  
12 – решетка катализаторная коническая; 13 – блок из бетона  
теплоизоляционный.

Рисунок 1.1 – Прямоточная труба реакционная .

Реакционные трубы изготавливают из стали 45Х25Н35БС, которая характеризуется высокой длительной и жаропрочностью. Вследствие крайне низкой пластичности указанной стали, трубы и заготовки из нее могут быть изготовлены только путем применения центробежного литья с последующим соединением заготовок одним из способов создания неразъемных соединений, например, сваркой [45].

Условия эксплуатации реакционных труб очень жесткие, так как работают при  $t = 520 - 830^{\circ}\text{C}$  и  $p = 38 - 35 \text{ кг/см}^2$ . Полностью длина реакционной трубы получается, после соединения заготовок из труб аргонодуговой сваркой, от 9м до 14м, в зависимости от конфигурации. «Прямоточная реакционная труба, которая работает под давлением, имеет верхний и нижний приварные фланцы с крышками. Фланцы уплотняют металлическими кольцами или специальными плоскими асбометаллическими прокладками. Верхнюю и нижнюю бобышки соединяют с газоподводящей и газоотводящей трубками сваркой. Размещенный на нижней крышке трубы опорный стакан и приваренная к нему опорная коническая катализаторная решетка из жаропрочной стали предусмотрены для отвода конвертированного газа. Нижняя часть опорного стакана наполнена теплоизоляционным бетоном для защиты нижней крышки трубы от воздействия высокой температуры.

Выше газоотводящего штуцера в наружной стенке реакционной трубы приварены четыре планки для крепления деталей (сепараторов), которые фиксируют интервалы между реакционными трубами. К нижнему фланцу приварен стержень (палец), которым реакционная труба свободно опирается на несущую балку. К верхнему фланцу приварены две серьги для подвески трубы с противовесом, к траверсе воспринимающей около 95% веса четырех труб, заполнены катализатором» [45,20].

## 1.2 Технология изготовления изделия

На данный момент трубы для химической промышленности производятся из хромо – никелевых сплавов, такие как 45Х25Н35БС,

12X18H12T, 02X18H11 и 12X18H10T. Химический состав рекомендованных реакционных труб – в том числе с легирующими компонентами: Nb, W, Ti, Co, Si, приводим в таблице 1.1 [20].

Таблица 1.1. Химический состав хромоникелевых сплавов и сталей.

Марка материалов	Химический состав основных элементов, %				
	C	Si	Mn	Cr	Ni
45X25H35BC	0,35-0,45	1,2-1,6	1,0-1,51	24,0-27,0	34,0-36,0
12X18H12T	$\leq 0,12$	$\leq 0,8$	$\leq 2,0$	17,0-19,0	11,0-13,0
02X18H11	$\leq 0,025$	$\leq 0,2$	$\leq 2,0$	17,0-19,0	10,5-12,5
12X18H10T	$\leq 0,12$	$\leq 0,8$	$\leq 2,0$	17,0-19,0	9,0-11,0

Таблица 1.2. Механические свойства сплава 45X25H35BC.

Марка материала	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$T_3$ , °C
45X25H35BC	>245	>490	>8	до 1100
12X18H12T	$\geq 215$	530-690	$\geq 35$	-196 до 600
02X18H11	157	451	-	до 800
12X18H10T	216	529	40	до 800

В проекте мы будем рассматривать соединение фланцевой заглушки (глухого фланца) с патрубком и донышком.

В нашем случае мы будем применять для патрубка и диска сплав 45X25H35BC, из-за соответствия режимам работы печи риформинга и изготавливается непосредственно на предприятии, фланцевые заглушки (глухие фланцы) изготавливаются из сплава ХН32Т.

Фланцевые заглушки предназначены для перекрывания концевых отверстий труб при монтаже трубопроводных систем. Они осуществляют функцию одной из основных деталей, которая предоставляет безопасность и надёжность конструкции [10].

Фланцевая заглушка (рис. 1.2) – это диск с кольцевой опорной поверхностью и отверстиями, которые предназначены для болтов, закрепляющих деталь на фланцах. Заглушка должна соответствовать сопрягаемому с ней фланцу по таким параметрам как материал, размеры,

рабочее давление и прочие технические характеристики. Данная конструкция во многом соответствует фланцам, но отличается отсутствием центрального отверстия.

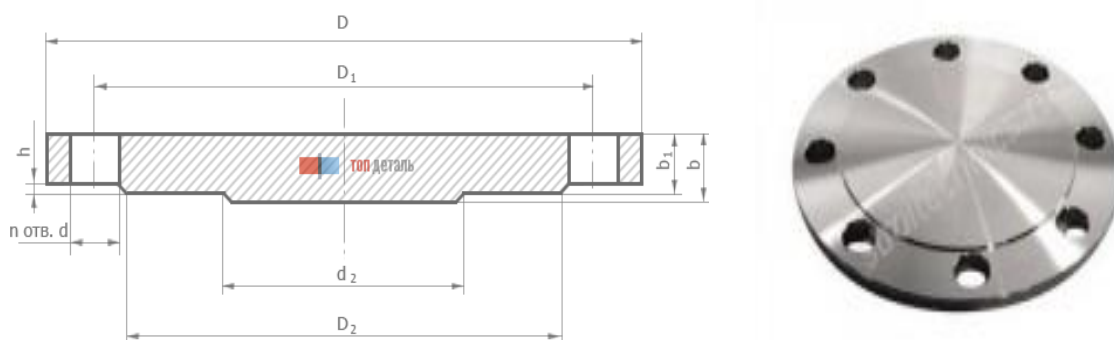


Рисунок 1.2 – Фланцевая заглушка.

Таблица 1.3. Геометрические размеры и вес заглушек фланцевых

Dy, мм	D, мм	D <sub>1</sub> , мм	D <sub>2</sub> , мм	b, мм	d <sub>2</sub> , мм	d, мм	h <sub>1</sub> , мм	h, мм	n, шт.	Масса, кг /span
40	145	110	88	14	36	18	3	2	4	1,24
50	160	125	102	14	46	18	3	2	4	1,55
65	180	145	122	14	60	18	3	2	4	2,04
80	195	160	138	14	76	18	3	2	4	2,44
100	215	180	158	16	94	18	3	2	8	3,51
125	245	210	188	16	118	18	3	2	8	4,69
150	280	240	212	18	142	23	3	2	8	6,99
200	335	295	268	20	196	23	3	2	12	11,49

Фланцевые заглушки применяют в диапазоне температур от -70 до +600 °С и легко выдерживают высокое давление. Современные материалы предоставляют возможность выполнять заглушку фланцевую (глухой фланец) подходящую для совместимости с агрессивными средами. фланцевая заглушка (глухой фланец) изготавливается из легированной, углеродистой, а также нержавеющей стали.

Фланцевые заглушки (глухой фланец) производятся из стальных листов или из сортового металлопроката.



Заглушка фланцевая (глухой фланец) отличается от фланца тем, что заглушка (глухой фланец) не имеет центрального отверстия, но по форме полностью соответствует фланцу. Поэтому материал, из которого изготовлена фланцевая заглушка (глухой фланец), рабочее давление, геометрические размеры заглушки фланцевой (глухой фланец) должны точно совпадать с деталью, с которой она соединяется [10].

Заглушки фланцевые АТК 24.200.02-90 или ОСТ 26-11-07-85 применяются в химической, нефтеперерабатывающей, нефтехимической, газовой, нефтяной и других смежных отраслях промышленности [11].

Химический состав фланцевой заглушки в таблице 1.4, химический состав патрубка и донышка в таблице 1.5.

Таблица 1.4. Химический состав стали ХН32Т по ГОСТ 4543-71, %.

Al	C	Cr	Mn	Ni	P	S	Si	Ti
≤ 0,5	≤ 0,05	19–22	≤ 0,7	30 – 34	≤ 0,03	≤ 0,02	≤ 0,7	0,25 – 0,6

Таблица 1.5. Химический состав стали 45Х25Н35БС по ТУ 1333-047-00220302-02, %.

C	Fe	S	P	Cr	Cu	Mn	Mo	Nb	Ni	Si	Sn	Ti
0,35-0,45	Осн.	<0,03	<0,03	23-27	<0,2	1,0-1,5	<0,5	1,3-1,7	34-36	1,2-1,6	<0,01	0,0005-0,1

В данный момент элементы соединяются при помощи ручной аргонодуговой сварки электродами марки Inconel 82 в среде аргона. Химический состав электродов приведен в таблице 1.6. Механические свойства электродов показаны в таблице 1.7.

Таблица 1.6. Химический состав электродов марки Inconel 82, %.

Ni+Co	Cu	Mn	C	Si	Cr	S	Ti	Nb+Ta	P	Fe	ост.
>67,0	<0,50	2,5-3,5	<0,10	<0,50	18,0-22,0	<0,015	<0,75	2,0-3,0	<0,030	<3,0	<0,50

Таблица 1.7. Механические свойства электродов марки Inconel 82.

	$\sigma_p$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_4$ , %
Среднее значение	590	360	38

Электроды сварочные марки Inconel 82 предусмотрены для сварки коррозионостойких и жаропрочных сплавов на никелевой основе типа ХН60ВТ, Inconel 600 и им подобных, которые эксплуатируют в агрессивных средах при температуре от – 196 до 550°C; низколегированных хромо – молибденовых теплоустойчивых сталей перлитного класса с высоколегированными сталями аустенитного класса эксплуатирующимися при температуре до 650°C; мартенситных тяжело свариваемых сталей со сталями аустенитного класса; отливок из жаропрочных сталей ограниченной свариваемости, а также наплавки переходных и плакирующих коррозионных слоев на изделия из низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных и теплоустойчивых сталей.

Технология производства труб подразумевает начальную операцию с комплектации металла на шихтовом участке.

Набранный материал закладывают в индукционную печь. Затем, расплавленный до  $t=1600^\circ\text{C}$  металл, разливают в раскрученные до 1900 оборотов в минуту и разогретые до 300°C формы (кокиля).

Для металлообработки деталей в структурном подразделении имеются металлообрабатывающие станки для глубокого сверления, на которых производят расточку трубных заготовок длиной до  $L=6000$  мм.

Кромки трубных заготовок перед сваркой обрабатывают металлорежущими инструментами. Затем на станке с ЧПУ нарезают фаски под разным углом для сварочных операций.

После положительных результатов проверки ВИК трубные заготовки отправляют на сборочную и сварочную операции.

Объединение сварочного оборудования допускает выполнять сварку труб по специальной технологической программе.

Первая операция автоматической аргонодуговой сварки заключается в том, чтобы соединить выплавленные и обработанные заготовки при помощи сварочного инвертора Tig 4000 i (рис. 1.3) в трубы заданной длины неплавящейся вольфрамовой проволокой на сварочном посту.

Сварочный инвертор служит источником питания дуги, который плавно позволяет настраивать величину силы тока [20].



Рисунок 1.3 – Сварочный инвертор Tig 4000i.

При выполнении прихваток выбираем необходимые режимы сварки:

Сила тока  $I_{св} = 200$  А. Напряжение  $U_{св} = 10 - 10,5$  В.

Сварка осуществляется с помощью сварочного автомата А – 25 под защитой аргона (Ar) с использованием проволоки сплошного сечения Thermanit 25/35 R диаметром  $\varnothing=2,4$  мм.

После того, как автоматическая сварка завершена, сварной шов подвергается проверке на присутствие видимых дефектов при помощи ВИК и цветной дефектоскопии.

Вторая сварочная операция, выполняется с помощью ручной аргонодуговой сваркой фланцев с обеих сторон трубной заготовки.

ВИК на присутствие дефектов проводится после каждой операции сварки.

В подготовку двух сварочных операций (фланцевой заглушки, патрубка и донышка), (рис. 1.4) входит:

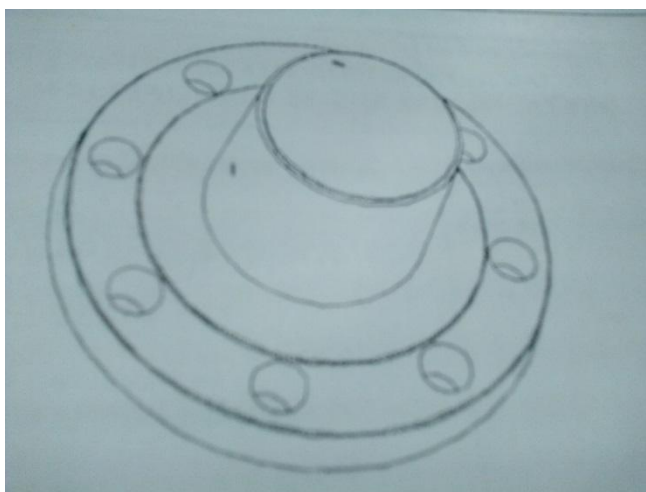


Рисунок 1.4 – Фланцевая заглушка с патрубком и донышком.

1) Зачистка поверхности патрубка под приварку донышка и зачистка поверхности фланцевой заглушки под приварку патрубка. Зачистку выполняют при помощи абразивных кругов (рис. 1.5).

2) Обезжиривание кромок и околошовной зоны донышка, фланцевой заглушки и патрубка под сварку при помощи ветоши и растворителя (рис. 1.6).



Рисунок 1.5 – Круг абразивный.



Рисунок 1.6 – Растворитель.

Для того, чтобы произвести сварочную операцию патрубка с доньшком, электродами марки Inconel 82 Ø3,2 мм с режимами сварки:  $I = 90 - 150 \text{ A}$  и  $U = 10 - 14 \text{ V}$ , детали прихватываются отдельными прихватками в 4-х противоположащих сторонах по ОСТ26.260.3 – 2001.

Сварка осуществляется в один проход при помощи электродов Inconel 82 Ø3,2 мм в положении Н1 с предварительным подогревом  $20^\circ\text{C}$  при  $I=100 \text{ A}$  и  $U = 11 \text{ V}$ .

Перед сваркой патрубка с фланцевой заглушкой, в патрубок укладывают муллитокремнеземистое каолиновое волокно (рис. 1.7).

Муллитокремнеземистое каолиновое волокно – эффективный изоляционный материал, который используется в качестве теплоизоляционного и термокомпенсационного материала [13].



Рисунок 1.7 – Муллитокремнеземистое каолиновое волокно МКРР-130.

Муллитокремнеземистый войлок (каолиновая вата) применяется для:

1. термокомпенсация плотных огнеупоров и бетонов;
2. заполнение полостей в кладке;
3. ремонт и огнеупорная футеровка;
4. набивка теплоизоляционных слоев транспортных вагонеток печей;
5. огнезащитные покрытия, клеи;
6. газопходы, дымовые трубы, теплогенераторы;
7. глиссажные трубы, паропроводы;
8. печи риформинга, катализа;
9. строительство зданий, котельных, судов;
10. изоляция резервуаров для сжиженных газов;
11. фильтрация высокотемпературных газов в агрессивной среде;
12. уплотнение дверей, заслонок, окон.

Свойства муллитокремнеземистого волокна (войлока):

1. высокая термостойкость;
2. незначительная плотность;
3. низкая теплопроводность;
4. малая теплоемкость;
5. стойкость к термоударам;
6. хорошая химическая стойкость;
7. материал эластичен и плотно прилегает к конструкциям;
8. устойчивость к вибрациям и деформациям;
9. материал относится к несгораемым;
10. хорошие электроизоляционные свойства;
11. хорошая звукоизоляция.

Преимущества муллитокремнеземистого войлока заключается в следующем:

1. Небольшая теплопроводность и ограниченное накопление тепла при малой массе волокна.
2. Доброкачественная теплостойкость: высокочистые волокна не поддаются расстекловыванию.
3. Отличная термостойкость: одеяло сохраняет свои свойства не при разовом применении.
4. Высокие звукоизоляционные свойства.
5. Устойчивость к расплавам цветных металлов, к щелочам (кроме концентрированных), а также к большинству других химических веществ.
6. Волокно не пропитывается жидким алюминием цинком, магнием и их сплавами.
7. Высокие электроизоляционные показатели, мало изменяющиеся с повышением температуры до 700 – 800°С.
8. Инертность к воде, водяному пару и различным минеральным маслам.

Таблица 1.8. Физико – механические характеристики ГОСТ 23619-79.

Наименование	Муллито – кремнеземистый войлок (каолиновая вата) марки МКРР-130
Длина, мм	5000 – 15000
Ширина, мм	600, 700
Толщина, мм	20 ± 5
Температура применения, °C <sub>max</sub>	1150
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	130
Коэффициент теплопроводности, Вт/мК, не более	25 – 0,039 300 – 0,127 600 – 0,147
Массовая доля Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> на прокаленное вещество, %, не менее	51
Массовая доля Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %, в пределах	–
Изменение массы при прокаливании, %, не более	0,6

Для того, чтобы произвести сварочную операцию патрубка к фланцевой заглушке, электродами марки Inconel 82 Ø3,2 мм с режимами сварки: I = 105 – 110 А и 25 – 26 V, детали прихватываются отдельными прихватками в 4-х противоположащих сторонах по ОСТ26.260.3 – 2001.

Сварка осуществляется в один проход при помощи электродов Inconel 82 Ø3,25мм в положении Н1 с предварительным подогревом фланцевой заглушки до 150°C при I = 110 А и U = 25 V.

После сварки устраняются шлифовальной машинкой брызги, если они есть, и проводится контроль при помощи цветной дефектоскопии по ОСТ 26-5-99 и визуальный осмотр по РД 03-606-03 на присутствие дефектов.

После сварочной операции наблюдались непровары, поры, трещины. Затрачивалось время на ремонт и расход материалов.



### 1.3 Основные сведения о никеле и его сплавах

Никель представляется жаропрочным, жаростойким и коррозионностойким металлом, это находит его использование в качестве конструкционного материала для изделий, которые подвергаются воздействию различных агрессивных сред в том числе при повышенных температурах, а также подверженных механическим нагрузкам при высоких температурах. Кроме этого никель является популярным легирующим элементом для сталей и сплавов.

Никель (Ni) – химический элемент с атомным номером 28 в периодической системе, «ковкий и пластичный металл. Имеет серебристый цвет с желтоватым оттенком, хорошо полируется, притягивается магнитом» [46]. Плотность никеля составляет  $8,902 \text{ г/см}^3$ , температура плавления  $t_{\text{пл.}} = 1453^\circ\text{C}$ , температура кипения  $t_{\text{кип.}} = 2730 - 2915^\circ\text{C}$ , данный металл «является ферромагнетиком, точка Кюри около  $358^\circ\text{C}$ . На воздухе компактный никель стабилен. Поверхность никеля покрыта тонкой пленкой оксида NiO, которая прочно предохраняет металл от дальнейшего окисления» [46].

Таблица 1.9. Физические свойства никеля (Ni).

Свойства	Никель
атомный номер	28
атомная масса, а.е.м	58,69
атомный диаметр, пм	248
$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	8,902
$C$ , Дж/(К·моль)	0,443
$Q$ , Вт/(м·К)	90,9
$T_{\text{пл.}}$ , °C	1453
$T_{\text{кип.}}$ , °C	2730 – 2915
$\lambda$ , кДж/моль	17,61
$L$ , кДж/моль	378,6
$V_m$ , см <sup>3</sup> /моль	6,6

Достоинства и недостатки никеля:

достоинства:

1. имеет высокую жаропрочность и жаростойкость;
2. обладает отличной устойчивостью к разрушению во многих агрессивных средах.

недостатки:

1. имеет высокую стоимость.



Рисунок 1.8 – Слитки из никеля.

### 1.3.1 Применение никеля и его сплавов

Никель в основной степени является составным элементом разных сплавов. Все нержавеющие стали непременно содержат никель, потому как он повышает химическую стойкость сплава. В свою очередь сплавы никеля обладают высокой вязкостью и применяются при выполнении прочной брони. В производстве наиболее важных деталей всевозможных приборов применяется сплав железа с никелем (36 – 38% никеля), который обладает низким коэффициентом термического расширения. Никель обширно применяют при производстве разной химической аппаратуры, в электротехнике, в кораблестроении, при производстве аккумуляторов щелочных и для многих других целей (рис. 1.9). Приготовленный специально дисперсный никель находит большое использование как катализатор различных химических реакций. «Оксиды никеля применяют при

изготовлении ферритных материалов и как пигмент для стекла» [46], керамики и глазурей; «оксиды и некоторые соли служат катализаторами различных процессов» [46]. Выпуск «железо – никелевых, никель – кадмиевых, никель – цинковых, никель – водородных аккумуляторов» [46] (рис. 1.10).



Рисунок 1.9 – Холодильники отбора проб.

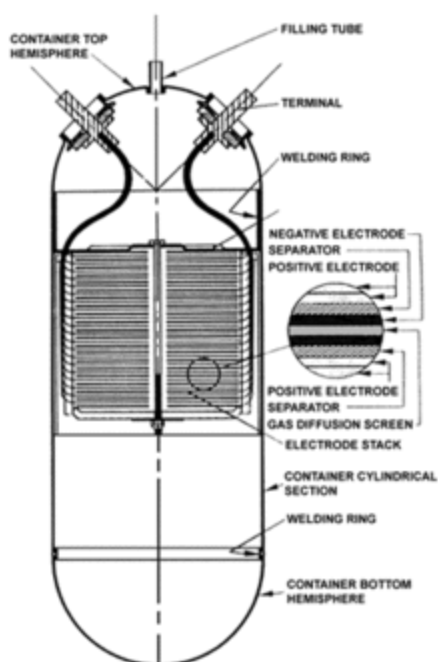


Рисунок 1.10 – Никель – водородный аккумулятор.

### 1.3.2 Марки никеля и сплавов

Современная индустрия изготавливает большое количество различных марок никеля.

«В зависимости от чистоты различают следующие марки никеля» [53]: Н0, Н1У, Н1, Н2, Н3, Н4. «Содержание большинства примесей в никеле не превышает сотых и тысячных долей процента. Наиболее вредные примеси в никеле и его сплавах – Bi, Pb» [53], Sb, «As, P, Cd.

Висмут и свинец вызывают красноломкость никеля» [53], так как при понижении температуры появляется жидкая фаза и они в Ni(никеле) не растворяются. «Сурьма и мышьяк ухудшают обрабатываемость никеля и его сплавов давлением. Фосфор и кадмий резко снижают механические, физические и технологические свойства никеля» [54].

Монель – коррозионностойкий медно – никелевый сплав. Основными компонентами являются никель (Ni), медь (Cu), железо (Fe), марганец (Mn). Обладает высокой коррозионной стойкостью и пределом прочности, хорошей пластичностью. Этот сплав нашел применение в химической, нефтяной, судостроительной, медицинской промышленности, а также в аппаратостроении.

Нихром – сплав, состоящий из следующих элементов: Ni (55 – 78%); Cr (15 – 23%); Mn (1,5%); остальное Fe. Удельное сопротивление  $1,0 - 1,1 \cdot 10^{-6}$  Ом·м, плотность – 8200 – 8500 кг/м<sup>3</sup>, температура плавления – 1100 – 1400 °С. Материал обладает высокими рабочей температурой (до 1100 °С) и механической прочностью (предел прочности при растяжении 0,65–0,70 ГПа). Указанный сплав хрома и никеля используется для изготовления нагревательных элементов промышленных и лабораторных электрических печей, паяльников, плиток.

Фехраль – железо – хромо – алюминиевый сплав, состоящий из следующих элементов: хром (Cr); алюминий (Al); железо (Fe). Стоит отметить, что содержание никеля всего не более 0,6%. Низкое содержание никеля делает данный сплав более дешевым по сравнению с нихромом.

Удельное сопротивление фехраля (номинальное значение) 1,39 мкОм·м, плотность – 7,21 г/см<sup>3</sup>, температура плавления – 1500 °С (по ГОСТ 12766.1 – 90). Фехраль обладает высокими рабочими температурами (до 1400 °С).

Константан – термостабильный электротехнический медно – никелевый сплав, состоящий из следующих элементов: никель (Ni), марганец (Mn), медь (Cu). Хорошо поддается обработке. Используется для изготовления термопар, реостатов и электронагревательных элементов с рабочей температурой до 400 – 500 °С, измерительных приборов низкого класса точности.

45X25H35BC – жаростойкий и жаропрочный сплав, состоящий из следующих элементов: никель (Ni), хром (Cr), марганец (Mn), кремний (Si), ниобий (Nb), железо (Fe). Используется для изготовления змеевиков, центробежнолитых труб для химической и нефтехимической, авиационной и атомной промышленности.

Твердые сплавы – неоднородные материалы, в которых частицы высокотвердых тугоплавких соединений (чаще всего карбиды, реже нитриды или бориды переходных металлов; наиболее широко используют карбиды титана, вольфрама, хрома, тантала, или их сочетаний) сцементированы пластичным металлом – связкой (Ni, Co, Fe и их сплавами). Твердые сплавы имеют высокую твердость и износостойкость и сохраняют данные свойства при температуре 900 – 1500°С.

В соответствии с областью применения выделяют следующие группы твердых сплавов:

1. инструментальные сплавы, которые применяют при обработке материалов давлением, штамповкой или резанием, при бурении горных пород и так далее;
2. конструкционные сплавы, которые служат для производства износостойких механизмов, деталей машин и приборов, включая и с особыми свойствами – высокой плотностью, большим временным сопротивлением и значительным модулем упругости;
3. жаростойкие и жаропрочные сплавы.

### 1.3.3 Жаростойкие и жаропрочные сплавы

Жаростойкие и жаропрочные сплавы отличаются высокой жаростойкостью и жаропрочностью, и это характеризует их использование в качестве конструкционных материалов для выпуска изделий с повышенными требованиями к коррозионной стойкости и механической прочности при высоких температурах.

Жаропрочные стали и сплавы – такие материалы, которые работают при высоких температурах на протяжении определенного периода времени в условиях сложно – напряженного состояния и обладают достаточным сопротивлением к коррозии в газовых средах.

Жаростойкие стали и сплавы – такие материалы, которые работают в ненагруженном или слабо – нагруженном состоянии при высоких температурах (более 550 °С) и обладают стойкостью к коррозии в газовых средах.

Основой для жаростойких и жаропрочных сплавов могут быть железо, никель, медь, кобальт, титан, алюминий. Преимущественно массовое распространение получили сплавы из никеля. Они могут быть порошковыми, литейными, деформируемыми. Самыми распространенными среди жаропрочных составляют сложнелегированные литейные сплавы на основе никеля, которые способны работать до температур 1050 – 1100 °С в течение сотен и тысяч часов при высоких динамических и статических нагрузках.

### 1.3.4 Классификация жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов

Если речь пошла о жаропрочных и жаростойких сплавах и сталях, то следует дать определение о жаропрочности и жаростойкости.

Жаропрочность – это способность сплавов и сталей «выдерживать механические нагрузки при высоких температурах в течение определенного времени. При температурах до 600°С обычно» [47] применим термин теплоустойчивость. Жаропрочностью также называют – напряжение, «которое способен выдержать металлический материал в конструкции при

определенной температуре за заданный отрезок времени, вызывающее заданную деформацию, не приводящую к разрушению» [47]. Если учитывают напряжение и время, то характеристику называют – пределом «длительной прочности; если время, напряжение и деформация – пределом ползучести.

Ползучесть» [47] – это проявление «непрерывной деформации под действием постоянного напряжения. Длительная прочность – сопротивление материала разрушению при длительном воздействии температуры.

Жаростойкость» [47] характеризуется сопротивлением «металлов и сплавов газовой коррозии при высоких температурах»[47].

Можно выделить следующие классификации жаропрочных и жаростойких сплавов и сталей, которые работают при высоких и повышенных температурах, например сплав ХН32Т.

Таблица 1.10. Механические свойства сплава ХН32Т по ГОСТ 24982-81

Вид продукции	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %
Лист тонкий	$\leq 196$	$\geq 470$	$\geq 25$

Термообработка: Закалка на воздухе или в воде  $t = \text{от } 1100 - 1150^\circ\text{C}$

Таблица 1.11. Механические свойства сплава ХН32Т при 20°C и при повышенных температурах.

$t_{\text{исп.}}$ , °C	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
20	196	520	54	80
600	108	390	50	72
700	98	250	60	60
800	78	200	88	60
850	74	180	75	70
900	69	110	90	80
1000	39	60	100	90

Таблица 1.12. Физические свойства сплава ХН32Т

Температура испытания, °С	$\lambda$ , Вт/(м·К)	Температурный интервал, °С	$\alpha \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup>
20	15,9	-	-
100	13,4	20-100	13,7
200	15,1	20-200	15,6
300	16,8	20-300	17,2
400	18,0	20-400	18,0
500	19,3	20-500	18,0
600	20,5	20-600	18,4
700	21,8	20-700	18,9
800	23,5	20-800	19,0
900	24,7	20-900	19,0

Таблица 1.13. Технологические параметры сплава ХН32Т.

Свариваемость:	неограниченно
Склонность стали к поражению флокенами	восприимчива
Склонность к отпускной хрупкости	не склонна

Сплав ХН32Т применяется в нефтехимическом машиностроении для изготовления газоотводящих труб, листовых деталей, фланцев высокотемпературных установок с длительным сроком службы при температурах 700 – 850°С; в нефтеперерабатывающей и газоперерабатывающей промышленности, в производстве аммиака.



Рисунок 1.11 – Фланцы из стали ХН32Т.



### 1.3.5 Свойства жаростойких и жаропрочных сплавов

Для жаропрочных сплавов важнейшим полезным свойством, с точки зрения практики, представляется способность материала выдерживать механические нагрузки в условиях высоких температур. Имеются различные схемы нагружения материалов из жаропрочных сплавов: «термические нагрузки вследствие изменений температуры, статические растягивающие, изгибающие или скручивающие нагрузки, динамическое воздействие скоростных газовых потоков на поверхность, динамические переменные нагрузки различной частоты и амплитуды» [47]. При этом указанные материалы должны выдерживать подходящий тип нагрузки.

Практически основными полезными свойствами жаростойких сплавов и сталей является коррозионная стойкость материала в газовых средах при высоких температурах.

При этом, с точки зрения выпуска готовых изделий важную роль представляют технологические свойства. При изготовлении деформируемых сплавов следует создать удовлетворительную технологичную легкость при обработке давлением, включая и при высоких температурах, а сплавы отлитые должны удовлетворять литейным свойствам таким как, жидкотекучесть и пористость.

Марки жаропрочных и жаростойких сплавов.

На данный момент сплавы на основе никеля обладают наибольшим значением в качестве жаростойких материалов, которые предназначены для работы при температурах от 700 до 1100°C.

Жаростойкие стали и сплавы на основе никеля и железа.

Ведущими жаростойкими материалами, которые эксплуатируют в газовых турбинах, печах и различного рода высокотемпературных установках с рабочей температурой до 1350°C, составляют сплавы на основе никеля и железа. Высокое сопротивление окислению сталей и сплавов связано в первую очередь с большим количеством хрома, который входит в состав сплавов.

### 1.3.6 Высоколегированные хромо – никелевые стали

Сплав 45X25Н35БС.

Таблица 1.14. Физические свойства 45X25Н35БС ТУ 1333-047-00220302-02.

Тепловое расширение, $E \cdot 10^{-6} K$	Теплопроводность, Вт / м*К	Удельная теплоемкость, Дж/кг*К	T пл., °С	T раб., °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
10,1 - 17.,1	55,4 - 75,5	456	1370 - 1400	0 - 5 00	8000

Термообработка: Закалка в воду или на воздухе при  $t = 1100 - 1150^{\circ}C$ .

Сплав 45X25Н35БС применяется: для изготовления центробежнолитых труб (рис. 1.12), которые предназначены для создания змеевиков трубчатых печей установок производства аммиака, сероуглерода, водорода, этилена, и др., которые работают в интервале температур  $760-1060^{\circ}C$  и давлении до 3,92 МПа ( $40 \text{ кгс/см}^2$ ); центробежнолитых труб, которые применяют в качестве комплектующих в составе оборудования для металлургической, стекольной, добывающей и перерабатывающей нефтехимической, машиностроительной, керамической, промышленности, как и предназначенных для создания заготовок и деталей, которые применяются в составе изделий авиационной и атомной промышленности.



Рисунок 1.12 – Трубы центробежнолитые.

Основной сложностью использования высоколегированных хромоникелевых сплавов является сложность создания неразъемных соединений в конструкциях из этих сплавов. Используемая в настоящее время технология соединения с помощью сварки плавлением (ручной аргонодуговой сварки, сварки ручной дуговой покрытыми электродами) самая применяемая, но очень кропотливая. При дуговых способах сварки имеют место значительные расходы на исправление дефектов, высокие требования к опыту сварщика, малая эффективность труда. Наиболее существенным недостатком является сложность соединения разнородных материалов, а также элементов с большой разницей толщин. Устранение этих недостатков и посвящена данная работа.

Задачи диссертации:

- 1) выбрать способ соединения элементов трубы реакционной, обеспечивающий максимальное качество изделия;
- 2) разработать методику экспериментов по изучению параметров, режимов и материалов на структуру и свойства соединения;
- 3) провести эксперименты и проанализировать полученные результаты экспериментов;
- 4) на основе полученных результатов сформулировать технические рекомендации соединения элементов трубы реакционной.

## 2 Анализ и выбор способа соединения

### 2.1 Сварка

«Сварка – технологический процесс соединения металлов, сплавов, полимеров и других материалов путем установления связей между атомами» [44] или молекулами свариваемых деталей с помощью введения тепловой и (или) механической энергии. Сварку можно производить с разными, но однородными материалами.

«Сварка является одним из наиболее совершенных, экономически выгодных, высокопроизводительных и в значительной степени механизированных технологических процессов. Поэтому ее широко применяют практически во всех отраслях машиностроения. Она позволяет надежно соединять между собой детали и элементы узлов машин, заготовки практически любых толщин и конфигурации. Поэтому сварные изделия или отдельные их узлы могут иметь очень сложную форму в сочетании с незначительной массой при относительно простой и нетрудоемкой технологии изготовления.

Существует несколько десятков способов сварки. Все они значительно отличаются один от другого по технике выполнения. Однако по характеру протекания процессов формирования соединения, в зависимости от агрегатного состояния металла в месте и во время сварки все существующие способы принято объединять в две группы: сварка плавлением и сварка с применением давления» [44].

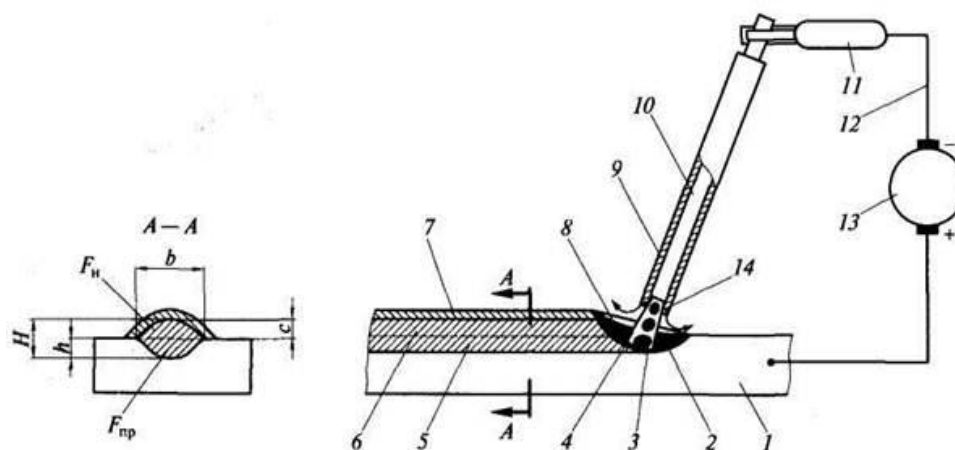
К «сварке плавлением относятся виды сварки, осуществляемой плавлением без приложенного давления. Основными источниками теплоты при сварке плавлением являются сварочная дуга, газовое пламя, лучевые источники энергии и «джоулево тепло». В этом случае расплавы соединяемых металлов объединяются в общую сварочную ванну, а при охлаждении происходит кристаллизация расплава в литой сварочный шов.

К сварке давлением относятся операции, осуществляемые при приложении механической энергии в виде давления. В результате металл деформируется и начинает течь, подобно жидкости. Металл перемещается вдоль поверхности раздела, унося с собой загрязненный слой. Таким образом, в непосредственное соприкосновение вступают свежие слои материала, которые и вступают в химическое взаимодействие.

Рассмотрим некоторые виды сварки» [48].

### 2.1.1 Дуговая сварка покрытыми электродами

При выполнении дуговой сварки вручную используют электроды с покрытием, которое защищает сварочную ванну от вредных факторов (окисления и азота из воздуха) и отдает легирующие элементы, для прочности сварного соединения. Покрытие электрода характеризует его состав.[49].



- 1 – металл основной; 2 – ванна сварочная; 3 – капля; 4 – дуга сварочная;  
 5 – металл проплавленный; 6 – металл наплавленный; 7 – корка шлаковая;  
 8 – шлак жидкий; 9 – покрытие электрода; 10 – стержень электрода;  
 11 – держатель электрода; 12 – цепь сварочная; 13 – источник питания;  
 14 – атмосфера защитная парогазовая.

Рисунок 2.1 – Ручная дуговая сварка покрытым металлическим электродом.

Преимущества способа:

- 1) Простое оборудование;
- 2) Сварка проводится во всех пространственных положениях;
- 3) Легкодоступность сварки в трудных местах;

- 4) Быстрый, по времени переход от одного вида материала к другому;
- 5) Много различных марок свариваемых металлов.

Недостатки способа:

- 1) Сварщик должен быть с высоким разрядом и большим опытом работы;
- 2) Качество сварного соединения и его свойства во многом формируются индивидуальным обстоятельством;
- 3) Невысокая эффективность труда;
- 4) Нежелательная и сложная производственная среда.

### 2.1.2 Сварка в защитных газах и смесях

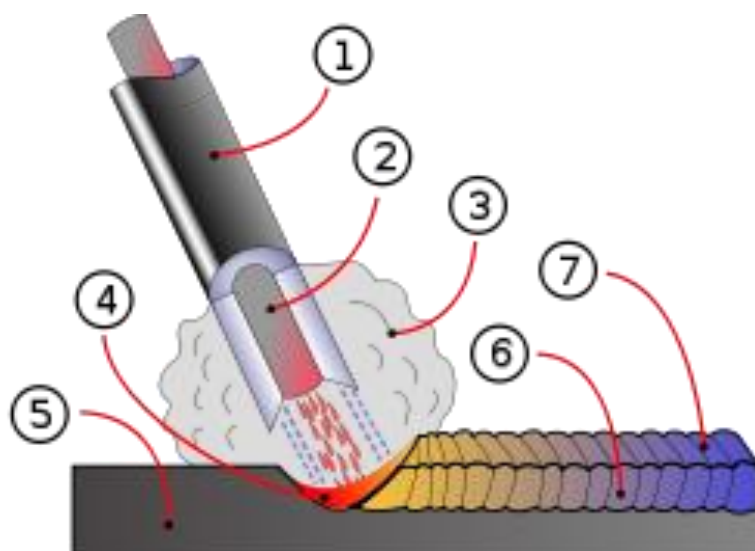
Способ дуговой сварки в защитных газах (рис .2.2) состоит в том, что в зону дуги поступает защитный газ. Выделяемое дугой тепло расплавляет основной металл и электрод. Остывая, металл сварочной ванны образует сварочный шов. Защитный газ отделяет расплавленный металл от газов в воздухе и блокирует их контакту.

По виду применяемых защитных газов, этот вид сварки разделяется на сварку:

- В инертных газах;
- В активных газах;
- В с смеси инертных и активных газах;
- Сварку со струйной защитой.

В сварочном процессе в качестве защитных газов применяют инертные (аргон и гелий), активные (углекислый газ, водород, кислород и азот) газы, газовые смеси ( $\text{Ar} + \text{He}$ ,  $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ,  $\text{Ar} + \text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  и др.).

Активные газы используются для обеспечения необходимых свойств шва свариваемых металлов. Используя газовые смеси, добиваются устойчивости дуги, улучшение формы шва, уменьшения разбрызгивания свариваемого металла.



1 – горелка, 2 – электрод, 3 – защитный газ, 4 – место расплава металла, 5 – заготовка, 6, 7 – шов

Рисунок 2.2. Сварка в защитных газах.

#### Достоинства:

1. высокое качество соединения при работе с разными металлами и сплавами вне зависимости от пространственного положения детали;
2. широкий диапазон толщин свариваемого металла — от десятой доли до нескольких десятков миллиметров;
3. возможность визуального контроля сварочной дуги и ванны, процесса образования сварочного шва;
4. узкая зона термического воздействия;
5. при многослойной сварке не надо зачищать швы;
6. высокая производительность работ;
7. не надо удалять флюс или шлак, зачищать швы.

#### Недостатки:

к недостаткам способа сварки в защитных газах по сравнению со сваркой под флюсом относится необходимость применения защитных мер против световой и тепловой радиации дуги.

### 2.1.3 Аргонодуговая сварка

Сварка аргоном (рис. 2.3) проводится двумя видами электродов: плавящимися и неплавящимися. Плавящиеся электроды вызывают розжиг дуги и одновременно являются припоем. Существует обширная классификация такой проволоки, разделяющейся по размеру, а также составу. Неплавящиеся электроды выполнены из самого тугоплавкого металла – вольфрама. При работе аппарата электрод провоцирует розжиг дуги, температура которой – 2000 градусов, а сам вольфрам начинает плавиться при 3600 и более градусов. Такой пруток нужен исключительно для розжига дуги и ее поддержания, присадочный металл подается вручную.

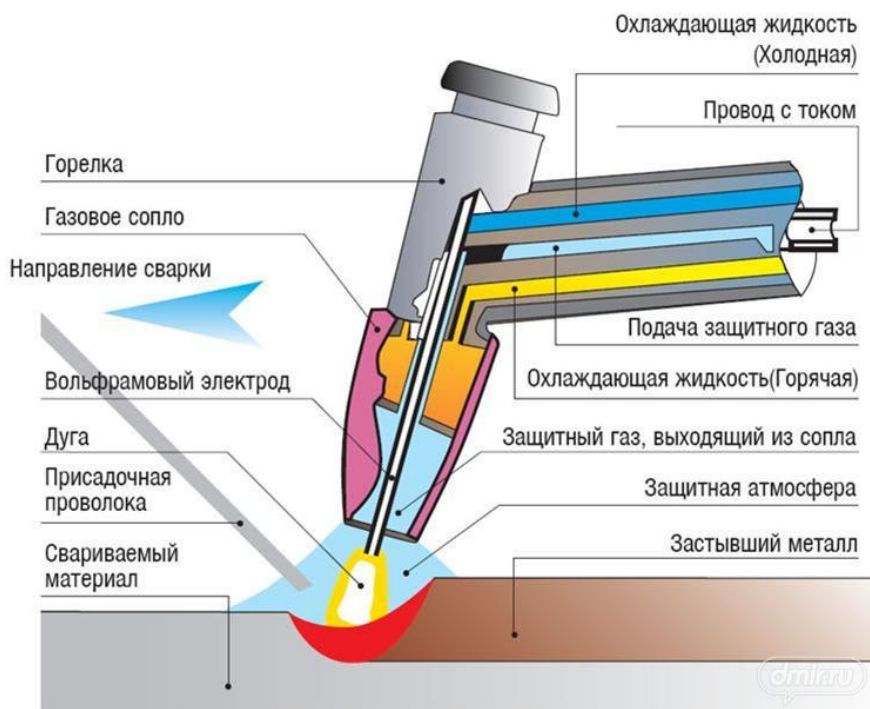


Рисунок 2.3. Аргонодуговая сварка

Достоинства:

1. сварка ведется при минимальных температурах;
2. металл в расплавленном состоянии надежно защищен от воздействия окружающего воздуха, а значит, в нем не появятся соединений, которые будут негативно влиять на качество сварного шва;



3. повышается скорость сварки за счет увеличения тепловой мощности сварочной дуги;
4. процесс сварки легко контролируется;
5. техника такой сварки достаточно проста, а это значит, что от сварщика не требуется высокой квалификации;
6. процесс сварки может быть полностью механизирован и автоматизирован.

А к недостаткам аргонодуговой сварки можно отнести:

1. сложности при работе на открытом воздухе или на сквозняке, так как газовая защита не очень устойчива при таких условиях;
2. возникновение ультрафиолетового излучения;
3. усложнение процесса при применении высокоамперной дуги в процессе сварки, так как в данном случае необходимо использовать охлаждение.

## 2.2 Пайка

«Пайка – физико-химический процесс получения соединения в результате взаимодействия твердого паяемого и жидкого припаяемого металлов соединяемых деталей.

Пайка» [5] очень похожа на сварку плавлением, но между ними есть принципиальная разница. «Если при сварке основной и припаяемый материалы находятся в сварочной ванне в расплавленном состоянии, то при пайке паяемый металл не плавится. Формирование шва при пайке происходит путем заполнения припоем зазора между соединяемыми деталями, т.е. процесс пайки связан со смачиванием и капиллярным течением, что не имеет места при сварке плавлением. В отличие от сварки плавлением пайка осуществляется при температурах, лежащих ниже температуры плавления паяемого материала.

Одним из преимуществ пайки по сравнению со сваркой плавлением является возможность соединения в единое целое за один прием множества заготовок, составляющих изделие» [5].

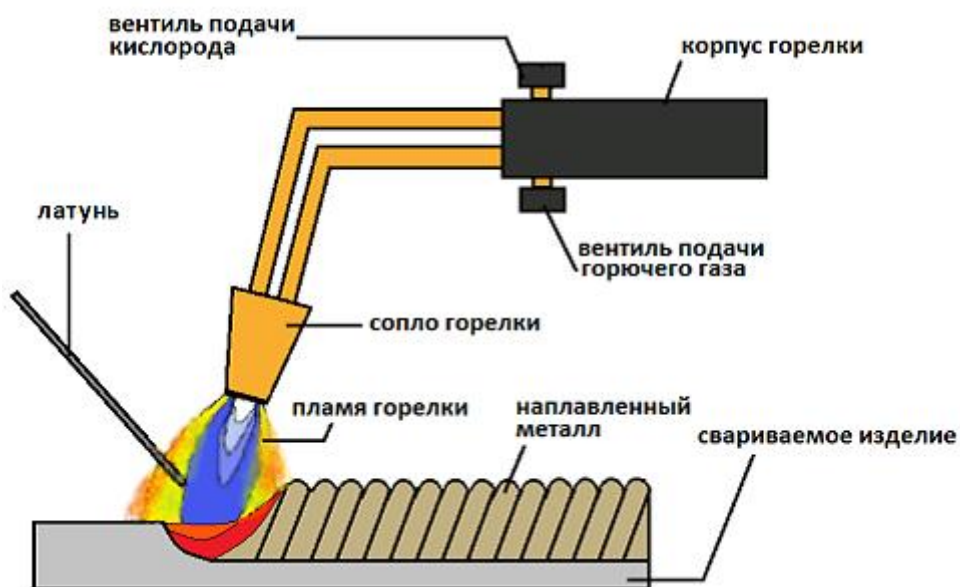


Рисунок 2.4. Пайка металлов.

«Поэтому пайка, как никакой другой метод соединения, отвечает условиям массового производства: позволяет соединять разнородные металлы, а также металлы со стеклом, керамикой, полупроводниками, графитом и другими неметаллическими материалами.

При пайке не происходит расплавления кромок паяемых деталей, что дает возможность сохранить в процессе производства форму и размеры изделия» [5].

«Стандарт (ГОСТ 17349-79) устанавливает технологическую классификацию способов пайки и порядок формирования наименования способа пайки» [5].

### 2.2.1 Классификация способов пайки

«Классификация способов пайки осуществлена по следующим независимым признакам: 1) удалению оксидной пленки; 2) получению припоя;

3) заполнению зазора припоем; 4) кристаллизации паяного шва; 5) источнику нагрева; 6) наличию давления на паяемые детали; 7) одновременности выполнения паяных соединений» [5].

Рассмотрим наиболее распространенные способы пайки.

Капиллярная пайка – пайка, при которой припой заполняет зазор между соединяемыми поверхностями деталей и удерживается в нем за счет капиллярных сил (рис.2.5).

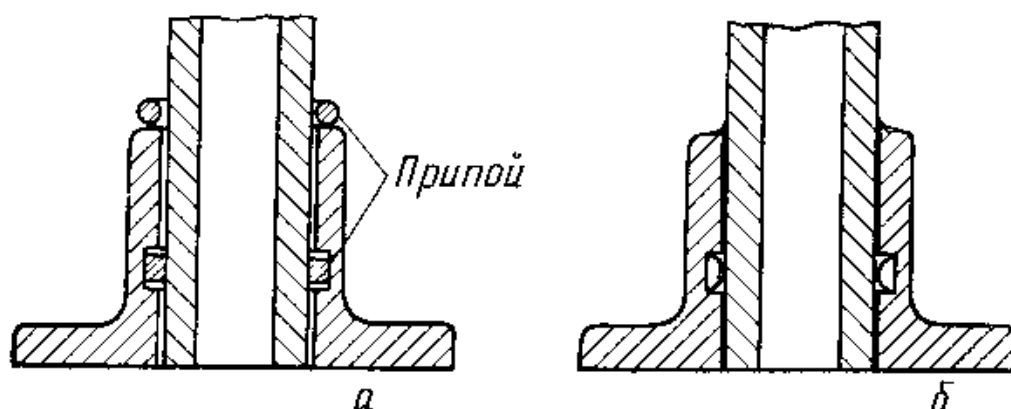


Рисунок 2.5. Схема образования шва при капиллярной пайке:  
а – перед пайкой, б – после пайки.

Диффузионная пайка – пайка, отличающаяся длительной выдержкой с целью упрочнения соединения за счет диффузии компонентов припоя и паяемых металлов.

При диффузионной пайке в зависимости от сочетания основного металла и припоя возможно образование в шве твердого раствора, благодаря чему существенно повышается пластичность и прочность паяного соединения. В процессе диффузионной пайки возможно образование в шве весьма тугоплавких, но, как правило, хрупких интерметаллидов. Их образование обусловлено протеканием реакционной диффузии, которая приводит к повышению температуры плавления металла шва и, следовательно, к повышению жаропрочности паяных соединений.

Пайка в печах обеспечивает равномерный нагрев соединяемых деталей без заметной деформации даже при их больших габаритах и сложной конфигурации. Для пайки применяют печи электросопротивления, с индукционным нагревом и газопламенные. В настоящее время распространение получают также газовые печи с беспламенным горением.



Рисунок 2.6. Электродпечь СШВ – 8.12/13 ЭМ 1

Индукционную пайку проводят с нагревом деталей токами высокой, повышенной и промышленной частоты. В этом случае необходимое тепло выделяется за счет тока, индуктируемого непосредственно в подлежащих пайке деталях.

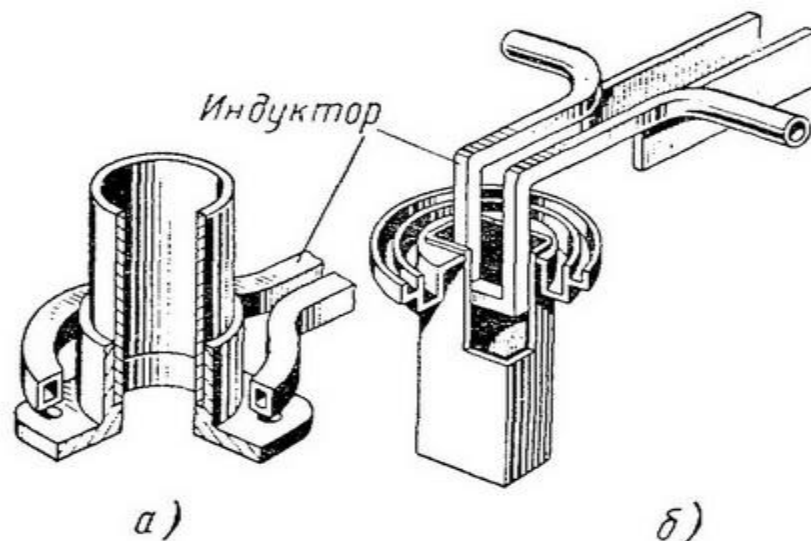
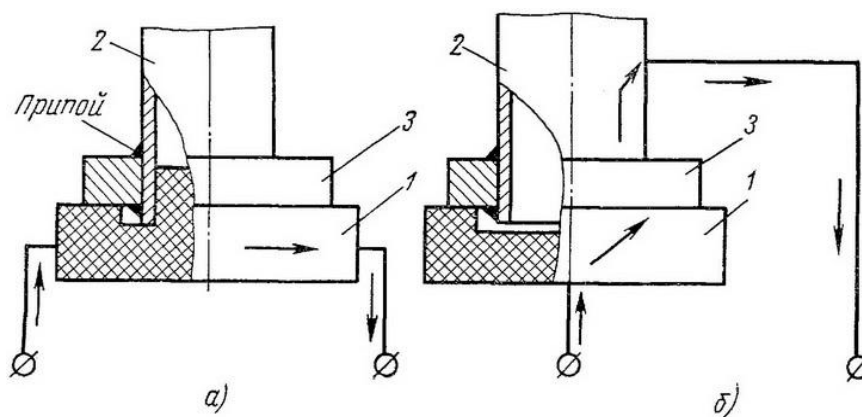


Рисунок 2.7. Петлевые индукторы для нагрева наружной (а) и внутренней (б) поверхности

Контактная пайка (пайка сопротивлением) происходит за счет тепла, выделяемого при прохождении электрического тока через паяемые детали и токоподводящие элементы. При этом соединяемые детали являются частью электрической цепи.



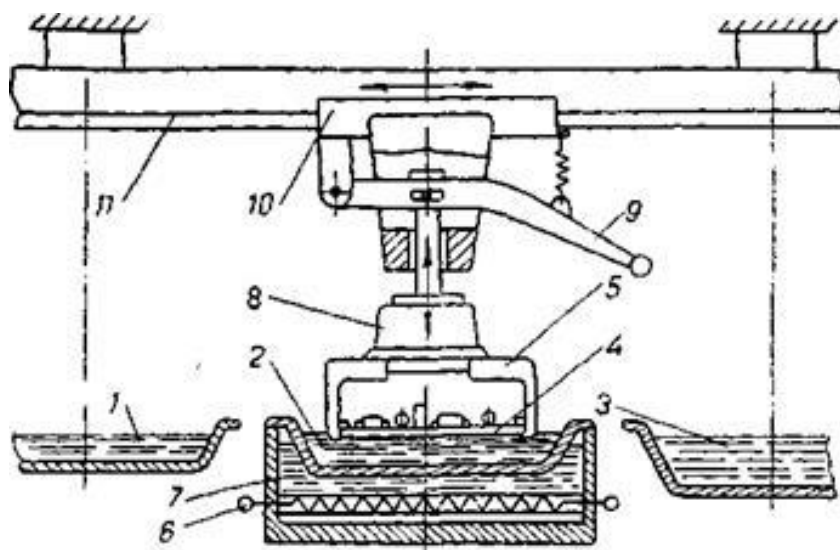
1 – электрод, 2 и 3 – паяемые детали.

Рисунок 2.8. Схемы установок для пайки с электроконтактным нагревом

«Пайка погружением (рис. 2.9) осуществляется путем нагрева деталей в ваннах с расплавами солей или припоев. При пайке в соляных ваннах нагрев может быть непосредственный и косвенный. В первом случае детали

погружают непосредственно в расплавленные соли, выполняющие роль не только источника тепла, но и флюса. Во втором случае паяемую деталь, помещенную в контейнер со специальной газовой средой или вакуумом, погружают в соляную ванну.

При нагреве в расплавленных припоях подготовленную к пайке деталь частично или полностью погружают в ванну с припоем» [6].



- 1 – ванна с флюсом; 2 – ванна с припоем; 3 – ванна для отмывки маски и остатков флюса; 4 – плата; 5 – приспособление для крепления платы; 6 – электронагреватель; 7 – ванна соляная; 8 – головка вибрационная; 9 – рычаг головки; 10 – каретка; 11 – направляющие каретки.

Рисунок 2.9. Схема установки для пайки плат погружением

«Пайка паяльником. При этом способе пайки нагрев основного металла и расплавление припоя осуществляются за счет тепла, аккумулированного в массе металла паяльника, который перед пайкой или в процессе пайки подогревается» [6].



Рисунок 2.9. Пайка паяльником

«Процесс взаимодействия твердого паяемого металла с расплавленным припоем может протекать активно только после удаления с их поверхности окисной пленки, которая препятствует образованию между ними металлической связи. Часто окисную пленку удаляют с помощью флюсов» [6].

### 2.2.2 Классификация флюсов для пайки

«Флюс паяльный – материал вспомогательный, который применяют для удаления оксидной пленки с поверхности паяемого материала и припоя и недопущения ее образования снова (ГОСТ 17325-79)» [6].

«Флюс должен удовлетворять следующим требованиям: при температуре пайки иметь достаточную жидкотекучесть, способствовать формированию шва, не изменять свой состав, в течение всего процесса сохранять флюсующие свойства, легко удаляться после пайки» [6].



Рисунок 2.10. Разновидности флюса



Флюсы делятся на однородные и неоднородные (сложные, которые состоят из нескольких компонентов). Если рассматривать свойства флюсов, то можно увидеть, что в них присутствуют такие компоненты как, соли, кислоты, окислы, а также вещества органического происхождения [6].

«Флюсы, которыми обрабатывают на данное время детали можно разделить на следующие группы: 1) флюсы на основе соединений бора (для пайки чугуна, меди сплавов на ее основе); 2) флюсы на основе фтористых соединений металлов (для пайки сталей аустенитного класса, никеля и сплавов на его основе); 3) флюсы на основе хлористых соединений металлов (для пайки легкоплавких металлов имеющих прочную оксидную пленку); 4) окисные флюсы; 5) флюсы на основе канифоли и других органических соединений (для низкотемпературной пайки, когда трудно промыть деталь после пайки)» [6].



Рисунок 2.11. Флюс паяльный

«При пайке температура начала действия флюса должна быть ниже температуры плавления припоя с тем, чтобы к моменту его расплавления процесс флюсования прошел достаточно полно. Если температура плавления и температура активного действия флюса будут значительно ниже



температуры плавления припоя, то процесс флюсования пройдет преждевременно, а это может привести к окислению основного металла или образованию на его поверхности других соединений еще до момента расплавления припоя.

Пайка с флюсами наиболее распространена и общедоступна. Однако область ее применения ограничена ввиду невозможности в ряде случаев полностью удалить остатки флюсов. Поэтому в настоящее время наблюдается тенденция к переходу на бесфлюсовую пайку, осуществляемую в специальных газовых средах или в вакууме» [6].

### 2.2.3 Газовые среды

«В результате некоторых недостатков флюсов были найдены искусственные газовые среды, позволяющие проводить пайку без них. Такие среды можно разделить на три основных типа: 1) нейтральные атмосферы; 2) активные атмосферы; 3) вакуум.

Нейтральные газовые среды выступают в роли защитной атмосферы. Нейтральным газом, который получил наибольшее распространение, является аргон. Ввиду высокой стоимости аргона целесообразно в случае печной пайки производить его регенерацию.

Гелий – одноатомный инертный газ. Как газовая атмосфера при пайке обеспечивает высокое качество паяных изделий из большинства конструкционных материалов.

Если пайка протекает при сравнительно низких температурах, то в ряде случаев вместо дефицитных аргона и гелия применяют более дешевый газ – азот.

При комнатной температуре азот отличается большой инертностью, но при нагреве до высоких температур вступает во взаимодействие со многими металлами. Азот в чистом виде применяют при пайке меди и сталей.

Активные газовые среды, применяемые при пайке, не только защищают металлы от окисления, но и способствуют удалению окисной пленки в

процессе пайки. Среди активных сред наибольшее распространение получили водород и различные газовые смеси, которые содержат водород и окись углерода.

Основным преимуществом применения при пайке нейтральных и восстановительных атмосфер является отсутствие твердых остатков на паяных деталях, в связи с этим отпадает необходимость промывать их после пайки. Применение газовых сред облегчает также механизацию и автоматизацию процесса пайки.

Вакуум так же, как и активные газовые среды, защищает от окисления и способствует удалению с поверхности металла окисной пленки.

Вакуум создается путем откачки газа насосами из контейнера или печи, в которых производится пайка» [6].

#### 2.2.4 Контроль паяных соединений

Качество продукции является важной частью на всех стадиях любого технологического процесса. Создание единого стандарта по контролю паяных соединений во многом облегчает задачу улучшения качества и ведения технической документации уже на начальных стадиях процесса. Методы контроля оговариваются в чертеже изделия или в специальных технических условиях.

Многие свойства являются важным фактором для качества паяных конструкций. Например, для деталей работающих при высоких температурах должны учитываться такие параметры, как жаропрочность, работающие в агрессивных средах – коррозионная стойкость. Прочность и надежность важна для абсолютно любых конструкций, работающих под нагрузкой.

Сплавы никеля и хрома – нихромы, известны своей жаропрочностью, но при этом отличаются и высокой коррозионной стойкостью в том числе и к кислотам. Из них изготавливают части газовых турбин, лопатки и детали двигателей, части печей, материал для поковки и так далее. Сплавы рассчитаны на работу при температурах до 600 – 850 С.

Самые распространенные дефекты такие как: непропаи, поры, раковины и трещины можно разделить на две группы.

Поры и раковины могут появиться из-за не соблюдения элементарных требований к сборке изделия и режимам пайки; непропаи – из-за неправильного расчета зазора и количества припоя. Трещины могут появиться как в местах спаев, так и на основном металле при нарушении процесса охлаждения.

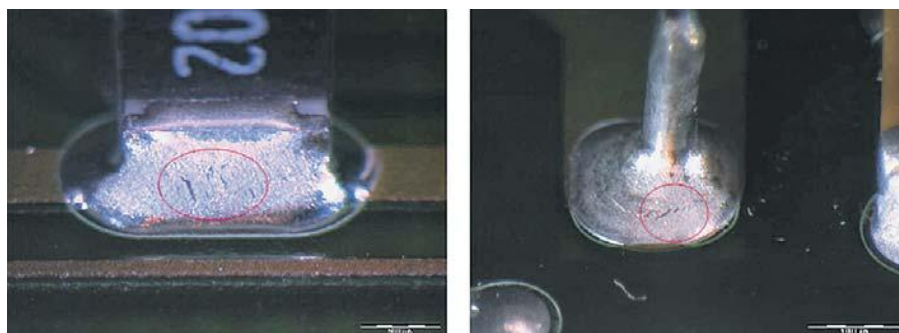


Рисунок 2.8 – Дефекты пайки: непропаи.

Трещины бывают разных видов: холодные (появляются до 200°C) и горячие свыше 200°C.



Рисунок 2.9 – Холодные трещины.

Такие дефекты, как шлаковые включения, можно обнаружить, когда не соблюдена чистота поверхности под пайку.

Для оценки качества паяных изделий применяется неразрушающий и разрушающий контроль.

К неразрушающему контролю принадлежат контрольные операции: ВИК (визуально измерительный контроль), ЦД (цветная дефектоскопия), УЗК (ультразвуковой контроль), рентгено- гаммаграфия, измерения вихретоками, испытания на герметичность и другие не требующие разрушения изделия или образцов.

Разрушающим контролем считают испытания, при которых вырезают или выплавляют серию образцов и на них, или даже на самом готовом изделии проводят диагностику результатов. К ним можно отнести такие как, испытания на разрыв, прочность, долговременное или быстрое растяжение.

В технической документации должно быть оговорено методы и параметры контроля к данному изделию.

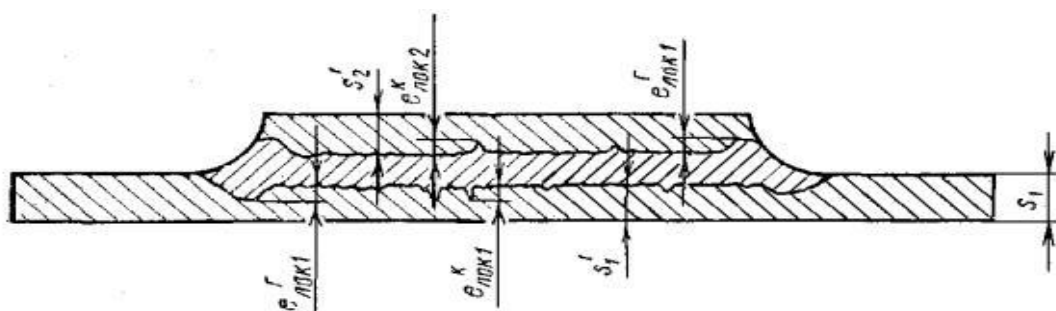


Рисунок 2.10 – Испытания паяных образцов.

Основным показателем определяемым свойства паяных соединений является их структура.

Для исследования структуры металлов, металлических сплавов и структуры различных зон паяных соединений широко используют метод световой микроскопии или метод металлографии. Используя этот метод, изучают размеры, форму, расположение кристаллов, крупные включения в них, дефекты паяных соединений в виде пор, трещин, включений. Исследования проводят на специально изготавливаемых шлифах (рис. 2.11).

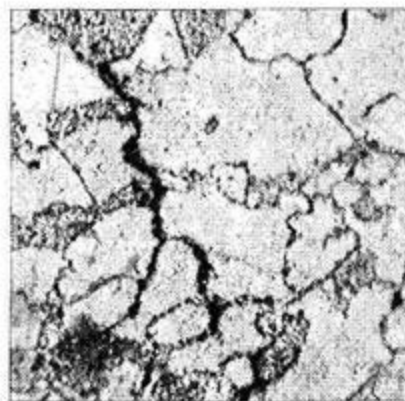


Рисунок 2.11 – Микрошлиф.

Для этого в плоскости металла, делают разрез. Полученную плоскость шлифуют на шлифовальном станке (рис. 2.12) и полируют до зеркального состояния и подвергают химическому или электрохимическому травлению. Поверхность шлифа подвергают травлению для создания рельефа или окраски в разные цвета структурных составляющих.



Рисунок 2.12 – станок для шлифования.

В металлографических исследованиях различают методы макроанализа при помощи макрошлифов и микроанализа с использованием микрошлифов.

Строение металла, изучаемое при помощи макроанализа называют макроструктурой. Это, как правило, более грубые детали структуры — конгломераты отдельных зерен, химическая и структурная неоднородность, дефекты в виде больших пор, трещин, непропаев, нарушения геометрии паяного шва в паяных соединениях и т.д.

Макрошлиф изучают невооруженным глазом или при небольших увеличениях. Визуальный осмотр паяных швов дает информацию о наплывах, газовых порах, непропаях и трещинах.

## 2.3 Особенности пайки высоколегированных сплавов

### 2.3.1 Пайка никелевых сплавов

Процесс пайки чистого никеля и сплавов на его основе очень похож на процессы пайки железа и сплавов содержащих его. Существующие отличия обусловлены, в первую очередь, различием физико-химических свойств. Как известно, поверхность никеля и сплавов на его основе при любой температуре окружающей (окислительной) среды покрыта слоем только одного оксида – NiO. Если в состав сплава ввести другие элементы, например железо и марганец, на поверхности образуются и другие оксиды, зачастую, более сложные, например комплексный оксид Ni-Mn-Fe-O на основе оксида никеля.

Введение в никель хрома (Cr), алюминия (Al), титана (Ti) приводит к химической реакции образования оксидов различных, в зависимости от структуры, типов:

- $Me_2O_3$  (изоморфных  $Cr_2O_3$ ), где в качестве металла-основы выступают никель (Ni), хром (Cr), железо (Fe), марганец (Mn) и алюминий (Al);
- $MeTiO_3$  (систем оксидов, изоморфных более сложному оксиду  $NiTiO_3$ ), где металлом-основой является железо (Fe) и никель (Ni);
- шпинели типа  $NiO \cdot Me_2O_3$ , структуры оксидов  $Me_2O_3$  и  $MeTiO_3$  изоморфны.

При понижении температуры окислительной среды (воздуха) до температуры около  $500^\circ C$  поверхность сплавов, содержащих в качестве основы сплав никеля и хрома (нихром), покрыта слоем оксида NiO. При повышении температуры структура и состав оксида зависят от степени легирования. При этом самостоятельно или совместно могут образовываться два других, отличных структурных типов оксида. При этом наблюдается такая картина, когда наружные слои обеднены легирующими элементами. При

дальнейшем повышении температуры до отметки 1200°C и выше оксидный слой на поверхности сложнолегированных сплавов на основе никеля, состоящий из NiO рекристаллизуется, что позволяет судить о полной потере металла сопротивляться воздействию кислорода при высоких температурах.

В связи с трудностями удаления оксида с поверхности механическим путем, никелевые сплавы перед пайкой обычно подвергают предварительному химическому травлению в специальных ваннах. Перерыв между травлением и пайкой должен составлять не более чем 24 часа. Один из наиболее часто применяемых растворов для травления имеет следующий состав: вода (H<sub>2</sub>O) – 1000 мл; серная кислота (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 1,87 г/см<sup>3</sup>) – 1500 мл; азотная кислота (HNO<sub>3</sub>, 1,36 г/см<sup>3</sup>) – 2250 мл и хлорид натрия (NaCl) – 36 г.

Травление происходит следующим образом: в горячую воду помещают опытный образец для промывки, затем, не остывший образец, опускают в ванну с раствором для протравливания (примерно на 5...10 сек.). После завершения травления образец снова промывают в горячей воде. Убирание остатков раствора осуществляют раствором аммиака (1% NH<sub>3</sub>).

Обязательным этапом является просушка, например, в древесных опилках.

Элементы паяной конструкции из никелевого сплава ХН77ТЮР, а также других сплавов с высоким содержанием легирующих компонентов травят в растворе, содержащем 150 мл аммиака (NH<sub>3</sub>), 50 г. фторида натрия (NaF) и 850 мл воды (H<sub>2</sub>O). Технологический процесс травления протекает в течение 10 мин при температуре 20°C; после этого детали подвергают промывке в воде, нагретой до температуры 60...70°C. Просушку деталей также проводят при температурах 60...70°C, используя, например, нагретый воздух. Поверхностный слой деталей, имеющих небольшие размеры, перед пайкой рекомендуется предварительно зачистить наждачной бумагой. После этого с поверхности удаляются загрязнения путем промывки деталей в одном из растворителей, например, спирте или трихлорэтано.

Для того, чтобы предотвратить последующее окисление и формирования защитной пленки, изделие не дают остыть путем помещения его во время пайки в газовые среды, вакуум и др.

### 2.3.2 Припой для пайки

подавляющее большинство сплавов на основе никеля предназначены для конструкций, работающих при высоких температурах. В связи с этим пайка таких сплавов припоями, имеющими температуру плавления ниже  $450^{\circ}\text{C}$ , применяется крайне редко. В случае необходимости пайки такими припоями применяют оловянно-свинцовые припои, в состав которых входит 50...60% олова (Sn), а для активации поверхности – флюсы типа 38Н и другие, который могут быть применены для низкотемпературной пайки легированных коррозионно-стойких сталей. Детали из сплавов на основе никеля, которые работают при относительно невысокой температуре ( $350\ldots 500^{\circ}\text{C}$ ), часто паяют припоями, основой которых является серебро. В этом случае в качестве припоев для пайки сплавов "нимоник75" и "нимоник80" (соответствующих хромоникелевым сплавам типа ХН78Т и ХН77ТЮ) рекомендуется использовать припои, имеющие следующий химический состав (в %):

- 1) 60Ag (серебра), 15Cu (меди) и 25Zn (цинка),  $t_{\text{пл}}=674\ldots 677^{\circ}\text{C}$ ;
- 2) 66,7Ag (серебра), 23,3Cu (меди) и 10Zn (цинка),  $t_{\text{пл}}=705\ldots 723^{\circ}\text{C}$ ;
- 3) 61Ag (серебра), 28,5Cu (меди) и 10,5Zn (цинка),  $t_{\text{пл}} = 720\ldots 746^{\circ}\text{C}$ ;
- 4) 85Ag (серебра) и 15Mn (марганца),  $t_{\text{пл}}=970\ldots 980^{\circ}\text{C}$ ).

Для деталей, работающих при более высокой температуре, можно использовать серебрясодержащие припои системы Ag–Mn–Pd. В качестве таких припоев можно использовать, например, припой, содержащий 75% серебра (Ag), 20% палладия (Pd) и 5% марганца (Mn). Температура плавления такого припоя составляет  $t_{\text{пл}}=1120^{\circ}\text{C}$ . При особых требованиях к стойкости паяных соединений против коррозии можно использовать припои с содержанием серебра более 50%.



При пайке никеля и его сплавов припоями на основе меди паяемый металл существенно растворяется в припое в результате контактно-реактивного плавления. Основным способом борьбы с этим процессом является строгая дозировка количества припоя, а также максимально близкое расположение припоя возле паяльного зазора или его укладка непосредственно в зазор и пайка при минимальной температуре без перегрева.

При контактном взаимодействии никеля и его сплавов с серой в процессе нагрева при пайке по межзеренным границам образуется эвтектика, имеющая низкую температуру плавления. Эта эвтектика вызывает значительное охрупчивание металла. «В связи с этим содержание серы (S) в газах, которые используются при пайке никеля и его сплавов (защитных и восстановительных) не должно быть более 0,40 мг/л; остатки органических веществ, масел, красок, смазочных и охлаждающих материалов, а также других веществ в состав которых может входить сера, необходимо тщательно удалить с поверхности деталей при их подготовке к пайке.

Аналогичное действие на никель и сплавы на его основе оказывают такие вещества как: свинец (Pb), висмут (Bi), мышьяк (As) и ряд других металлов, имеющих низкую температуру плавления.

Сплавы на основе никеля типа монель и нихром имеют склонность к жидкометаллическому охрупчиванию в контакте с расплавленными припоями, особенно припоями, содержащими в составе серебро (Ag), кадмий (Cd), цинк (Zn). Для того, чтобы избежать хрупкого разрушения под действием внешнего напряжением пайку изделий из этих сплавов осуществляют после отжига и при полном отсутствии растягивающих напряжений: как внутренних, так и внешних. Нагрев изделий под пайку может быть осуществлен разными способами: в электрических печах, индукционным нагревом, в ваннах с расплавом солей, газопламенным нагревом и т.п.

На сегодняшний день пайка все чаще применяется при создании конструкций различного назначения из высокожаропрочных сплавов на основе никеля. Соединение деталей из таких сплавов сваркой плавлением

очень сильно осложнено с высокой склонностью данных сплавов к образованию «горячих» трещин. Также высока вероятность образования и «холодных» трещин в результате нагрева и охлаждения сварных соединений в интервале температур 700...800°C. Причиной этого является высокий уровень остаточных напряжений которые образуются при неравномерном охлаждении после термического цикла сварки.

Таблица 2.1. Припои на никелевой основе (США) » [4]

Припой	Состав припоя, %						Температура плавления, °C
	Cr	B	Si	C	P	Fe	
B Ni-1	13-15	2,75-4	3-5	0,6	-	4-5	1180
B Ni-2	6-8	2,75-3,5	4-5	-	-	2-4	1060
B Ni-3	-	2,75-3,5	4-5	0,006	-	1,5	1070
B Ni-4	-	1-2,2	3-4	0,06	-	1,5	1090
B Ni-5	18-20	9,75-10,5	0,15	0,15	10	-	990
B Ni-6	-	-	-	0,15	10-12	-	940
B Ni-7	11-15	-	-	-	9-11	-	950
Никробрейз 1	4,5-6,5	3,0	-	0,15	-	3	1050
Никробрейз 2	13,5	3,5	4,5	-	-	4,45	1180
Эндевранс 52	-	2,9	4,5	-	-	-	1070
Никробрейз 10	-	-	-	0,15	11	-	980
Никробрейз WG	17,5	3,0	3,5	0,15	-	3,5	1150
Эндевранс 50	-	1,9	3,5	-	-	-	1080
Эндевранс 56	16	3,5	4,5	-	-	4	1150
Эндевранс 53	7,0	2,9	4,5	-	-	3,0	1056

Применение пайки развивалось в четырех направлениях, определяемых выбором и способом образования припоев на никелевой основе с относительно невысокой температурой плавления, условиями пайки в вакууме и использованием давления.

Для понижения температуры плавки припоев на основе никеля велось при помощи включения в расплав таких легирующих элементов, как Si, Mn, B, P, C, которые приведены в таблице 2.1.

Данные припои удовлетворяют требованиям при пайке сплавов на основе никеля. Пайку Cr-Ni сплавов припоями, которые содержат такие элементы как бор(B) и бериллий(Be), рекомендуется проводить с

применением никелированием поверхности из-за появления межзеренной химической эрозии. При том, что такой процесс, как никелирование, может защитить от образования оксидной пленки, от таких легирующих веществ как Al и Ti.

Пайка такими припоями тонкостенных деталей из Cr-Ni сплавов противопоказана.

Припои легированные кремнием(Si) применимы, но пайку необходимо производить с незначительным нагревом, но с контролируемой временной выдержкой, так как тоже может произойти химическая эрозия сплава и ухудшится структура паяемого соединения.

В процесс пайки Cr-Ni сплавов должны применяться так называемые, активные флюсы. Пайку этих сплавов, легированных бором, проводят в печах в атмосфере сухого водорода, для избежания образования легкоплавкой эвтектики. Также возможно проводить пайку Cr-Ni сплавов в вакууме с использованием нейтральных газов.

Диффузионную пайку Cr-Ni сплавов можно проводить как в вакууме, так и в инертных газах. В качестве припоя рекомендуется использовать припои в виде тонкой ленты, которую помещают непосредственно в зазор. При такой пайке, с бор содержащими припоями, скорость диффузии становится выше при повышении температуры.

Можно рассмотреть способ пайки хромо-никелевых сплавов с применением припоев в виде ленты таких легирующих элементов, как ванадий(V), ниобий(Nb) и титан(Ti). Пайка происходит при помощи давления на соединяемые детали в вакууме или среде активных газов.

При пайке Cr-Ni сплавов возможно применение припоев на основе меди, но не рекомендуют из-за последующего ухудшения физических свойств.

Во избежании получения хрупких швов припои на основе алюминия(Al), магния(Mg), титана(Ti) и цинка(Zn) категорически не применяют.

Марганцевые припои на никелевой основе с добавлением хрома не способствуют химической эрозии, но при долгом соприкосновении жидкого припоя, она может иметь место.

Как оказалось, самыми лучшими припоями для процесса пайки жаропрочных изделий на никелевой основе являются палладиевые припои, которые при пайке, например, в вакууме или в защитных газах, такой как аргон, способствуют повышению коррозионной стойкости. Не располагают к появлению химической эрозии. И при  $T_{пл.} < 1250^{\circ}\text{C}$  образуют паяные швы жаростойки до  $500 - 800^{\circ}\text{C}$ .

Нанесение на паяемый металл никелевого покрытия, а также введение в зазор никелевой фольги или никелевого порошка способствуют лучшему затеканию припоев при пайке никелевых сплавов типа инконель X состава (%): 73 Ni; 15,51 Cr; 7 Fe; 0,04 C; 0,8 Al; 2,5 Ti; 0,3 Si; 0,85 Nb + Ta.»[4].

Таблица 2.2. Механические свойства паяных соединений из никелевого сплава инконель X\*[4]

Припой	Температура испытания, $^{\circ}\text{C}$	Предел выносливости ( $\tau=100$ ч), МПа	Временное сопротивление при $20^{\circ}\text{C}$ , МПа	Температура пайки, $^{\circ}\text{C}$
Ni – Cr – B	649	185.2	-	1120
Ni – Cr – B	816	44.1	282.2	-
Pd – 40% Ni	649	123.5	-	-
Pd – 40% Ni	816	20.6	-	-
Ni – P	-	-	91.1	982
Ag – Pd - Mn	-	-	217.6	1232

«Для активирования поверхности деталей под пайку наилучшим образом происходит с помощью диффузионной и контактно-реактивной пайки путем подачи жидкого припоя в зазор.

Такой способ соединения паяных конструкций наиболее предпочтительный для пайки жаропрочных никелевых сплавов с легированными элементами. Этот способ, по данным Дж.С.Хоппина, был применен для соединения деталей авиационных газовых турбин, применением припоя на никелевой основе с добавлением 0,18% углерода, 1% бора и 18% хрома.

Также при способе высокотемпературной пайки Cr-Ni сплавов применяют никелевые припои, но только в том случае чтобы поверхность паяемых деталей должна быть тщательно очищена при помощи шлифования и травления. При этом улучшается качество растекаемости и смачивания припоем поверхности для пайки.

Нанесение никелевого покрытия на такие сплавы также улучшает смачивание их жидкими никелевыми припоями» [4].

По ГОСТ 17325-79 различают два основных вида пайки:

1. высокотемпературная пайка,
2. низкотемпературная пайка.

При высокотемпературной пайке температура плавления припоев выше 450°C, а при низкотемпературной – ниже 450°C.

В основе высокотемпературных припоев имеется медь, цинк, серебро, никель.

В низкотемпературных припоях основой являются свинец, олово, сурьма.

Требования к припоям:

1. температура плавления припоя должна быть ниже температуры плавления основного металла;
2. хорошая жидкотекучесть, смачиваемость паяемого металла, способность проникать в щели и зазоры;
3. хорошая коррозионная стойкость. Не ниже, чем у основного металла.

Таблица 2.3. Химический состав припоев на никелевой основе.

Марка	Содержание основных элементов, %(масс.) (Ni – основа)											
	Mn	Si	Cr	Nb	Fe	W	Mo	B	Li	Al	Ti	Другие элементы
AALBA DENT	-	4,5	14	-	4,5	-	-	-	-	-	-	-
ВПр10	10-15	2,5-4,0	19-21	2,0-3,5	3-5	-	-	-	0,01-0,25	-	-	Na – 0,01-0,25 K – 0,01-0,25
ВПр11	-	4-5	12-14	-	4,5-5,5	-	14-17	0,2-0,4	-	0,1-1,0	-	-
Wiron solder	-	3,5	19	-	5	-	5,5	<1	-	-	-	-
Ni-Cr	-	4,5	14,0	-	4,5	-	-	3,0	-	-	-	-

Таблица 2.4. Химический состав припоев с палладием.

Система припоя	Содержание основных элементов, %(масс.) (Pd – основа)					Температура полного расплавления, °C
	Cu	Ni	Cr	Ge	Si	
Ni-Pd-Cr-Ge	-	58	15	4	-	1283
Pd-Cr-Ni (ПЖК-1000)	-	33	19	-	0,2	( $T_{\text{ликв}} = 1237$ ) ( $T_{\text{пайки}} = 1250$ )
Ni-Cu-Cr-Pd	15	60	15	-	-	1313

На сегодняшний день достаточно перспективным является применение аморфного припоя ВПр51. В состав припоя, содержащего такие традиционные для жаропрочных припоев на основе никеля элементы, как хром, кобальт, молибден, ниобий, титан, дополнительно вводят железо, марганец, а также кремний и бор. С помощью введения в сплав дополнительных компонентов обеспечивается необходимый уровень значений жаростойкости припоя и паяных соединений на уровне значений жаростойкости не ниже основного материала. Сравнительно низкое содержание хрома и молибдена в совокупности с введением бора позволяет существенно ( $< 1100^{\circ}\text{C}$ ) снизить температуру пайки, обеспечить низкую эрозионную активность припоя и, как показали испытания, описанные далее, не сказывается на уровне жаростойкости и прочности паяных соединений. Оптимальным сочетанием

содержания железа и кобальта также достигается уменьшение растворения паяемого материала, повышение прочности, пластичности и снижение способности к охрупчиванию паяных соединений при хорошем уровне смачиваемости. Введением титана, который является сильным раскислителем сплавов, в совокупности с наличием в сплаве ниобия достигается необходимый уровень жаропрочности, обусловленный образованием тугоплавких соединений (боридов и силицидов) на их основе. Марганец введен в состав припоя для обеспечения необходимой смачиваемости и растекаемости припоя по поверхности паяемого материала. Кроме того, этот элемент позволяет снизить температуру плавления, что в совокупности обеспечивает высокий уровень прочностных характеристик паяных соединений.

### 2.3.3 Активация поверхности при пайке

Флюс согласно ГОСТ 17325-79 – химическое вещество, применяемое для удаления окисной пленки с поверхности паяемого материала и припоя в процессе пайки [5].

Флюсы должны удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Температура плавления флюса и его удельный вес должны быть ниже температуры плавления и удельного веса припоя.
2. Флюс должен полностью расплавляться и иметь хорошую жидкотекучесть при температуре пайки, но в то же время не должен быть слишком текучим, чтобы не «уходить» от места пайки.
3. Флюс должен своевременно и полностью растворять окислы основного металла, причем флюс должен действовать при температуре на несколько градусов ниже температуры плавления припоя.
4. Флюс не должен образовывать соединений с основным металлом и припоем, а также поглощаться ими.
5. Флюс должен равномерным слоем покрывать поверхность основного металла у места пайки, предохраняя его от окисления в

продолжение всего процесса пайки. Однако для того, чтобы припой мог сплошным слоем покрывать поверхность основного металла, необходимо, чтобы адгезия флюса к основному металлу (т. е. силы сцепления между флюсом и основным металлом) была слабее, чем адгезия припоя (т. е. силы сцепления между припоем и основным металлом).

6. Флюс не должен испаряться и выгорать при температуре пайки, а продукты его разложения и окислы должны вытесняться припоем, легко удаляться после пайки и не вызывать коррозии.

Для пайки мягкими припоями применяют кислотные или активные, антикоррозийные, бескислотные, активизированные флюсы. Кислотные или активные флюсы – на основе хлористых соединений – интенсивно растворяют окисные пленки на поверхности основного металла и тем самым обеспечивают хорошую адгезию и, следовательно, высокую механическую прочность соединения.

Остаток флюса после пайки вызывает интенсивную коррозию соединения и основного металла, а потому после пайки место пайки нужно тщательно промывать. Для пайки проводников при монтаже электрорадиоприборов применять кислотные флюсы категорически запрещается.

### Кислотные флюсы

К кислотным флюсам относятся хлористый цинк (обычно в виде 30%-ного водного раствора с добавкой 0,6 – 0,7% свободной соляной кислоты; составляет около  $263^{\circ}\text{C}$ ), флюс-паста (хлористый цинк или хлористый аммоний с соответствующим наполнителем: ланолин, вазелин, глицерин и т. п.;  $t_{\text{пл}} = 263^{\circ}\text{C}$ ), флюс «Прима I» (раствор хлористого цинк-аммония в смеси воды и этилового спирта с добавкой глицерина,  $t_{\text{пл}} = 170^{\circ}\text{C}$ ).



## Антикоррозийные флюсы

Антикоррозийными флюсами являются флюсы на основе фосфорной кислоты с добавлением различных органических соединений и растворителей, а также флюсы на основе органических кислот. Флюсы этой группы не вызывают коррозии черных металлов и поэтому после пайки не нужно удалять остатки флюса.

### Флюс ВТС

Флюс ВТС (смесь технического вазелина с салициловой кислотой, триэтаноламином и этиловым спиртом) применяется для пайки меди, латуни, бронзы, константана, серебра, платины и сплавов платиновой группы. Этот флюс особенно удобен для пайки электромонтажных соединений, так как он обеспечивает чистоту и надежность пайки и не вызывает коррозии, даже если остается в местах пайки.

### Бескислотные флюсы

Пайка соединений при монтаже электрорадиоприборов производится, как правило, бескислотными флюсами на основе канифоли.

Сосновая канифоль представляет собой в основном смесь смоляных кислот. При хранении на воздухе канифоль поглощает кислород, причем поглощение тем больше, чем выше температура. Измельченная канифоль в смеси с воздухом способна взрываться. Температура плавления (размягчения) канифоли колеблется в пределах от 52° до 83° С; при 125° С канифоль переходит в жидкое состояние. Основное достоинство канифоли состоит в том, что в расплавленном состоянии (при температуре 150° С) она способна растворять окислы, а после затвердевания на паяном соединении остаток флюса не вызывает коррозии. Остаток канифоли не гигроскопичен и является хорошим изолятором, что также относится к числу достоинств канифоли как флюса для пайки монтажных соединений. Являясь поверхностно – активным веществом, канифоль существенно улучшает растекание припоя.

Канифоль относится к флюсам химически мало активным и может применяться при условии, если детали тщательно подготовлены к пайке, т. е. зачищены или залужены.

В качестве флюсов для пайки монтажных соединений применяют натуральную канифоль (ГОСТ 797-64), а также растворы, канифоли в спирте (флюс КЭ и глицерино – канифольевый).

### Активированные флюсы

Активированные флюсы на основе канифоли применяют для пайки металлов и сплавов, плохо поддающихся пайке с канифольевым флюсом; они также ускоряют процесс пайки меди и медных сплавов.

В качестве активизаторов в канифоль вводят в небольших количествах солянокислый анилин, фосфорнокислый анилин, феноловый ангидрид, солянокислый диэтиламин, салициловую кислоту и т. д.

Лучшим для пайки монтажных соединений из флюсов этой группы является флюс с анилином.

Для пайки твердыми припоями применяются в основном кислотные флюсы, остатки которых необходимо удалять после пайки. В зависимости от температуры плавления они подразделяются: на флюсы с температурой плавления выше  $750^{\circ}\text{C}$ , применяющиеся для пайки тугоплавкими припоями, и флюсы с температурой плавления ниже  $750^{\circ}\text{C}$ , применяющиеся для пайки сравнительно легкоплавкими серебряными припоями. В качестве тугоплавких флюсов наибольшее – распространение получили бура и борная кислота. Активной группой этих флюсов является борный ангидрид  $\text{B}_2\text{O}_3$ , который, вступая в реакцию с окислами металлов, образует бораты.

Буру применяют в виде безводной соли  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  и в виде кристаллической соли  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ .

Кристаллическая десятиводная бура начинает плавиться при  $75^{\circ}\text{C}$ ; по мере повышения температуры нагрева бура теряет воду, сильно при этом вспучиваясь и разбрызгиваясь, и постепенно переходит в безводную соль

$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (плавленная или жженая бура); плавящуюся при температуре  $783^\circ \text{C}$ . Во избежание кипения буры при пайке ее обычно применяют в прокаленном виде. Кристаллизационную воду удаляют путем нагрева буры до  $400 - 450^\circ \text{C}$ . Активное действие буры начинается с температуры  $800^\circ \text{C}$ , при более низких температурах бура плохо растекается. Бура в расплавленном состоянии может быть нагрета до высоких температур без заметного испарения, она весьма жидкотекучая и энергично растворяет окислы многих металлов, в особенности меди.

Борная кислота является менее активным флюсом, чем бура. Температура активного действия борной кислоты выше, чем буры, и составляет  $900^\circ \text{C}$ . Одну борную кислоту редко применяют в качестве флюса. Смеси буры и борной кислоты являются основой большинства флюсов.

Для повышения активности смеси буры и борной кислоты при пайке нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов в состав флюсов вводят фтористый кальций и другие добавки.

В качестве легкоплавких флюсов для пайки серебряными и медно-фосфористыми припоями в основном применяют смеси галоидных солей щелочных металлов с борнокислыми солями. Галоидные соли флюсуют окислы главным образом физическим растворением, борнокислые соли оказывают химическое действие.

Флюсы применяют в виде пасты, порошка и в жидком виде.

Иногда флюсующее действие производит сам припой с соответствующими добавками раскислителей (например, меднофосфористые припои).

При пайке жаропрочных сплавов, содержащих хром, титан, молибден, вольфрам, в состав боридных флюсов вводят фториды щелочных и щелочно – земельных металлов – фтористый калий ( $\text{KF}$ ), фтористый натрий ( $\text{NaF}$ ), фтористый литий ( $\text{LiF}$ ), фтористый кальций ( $\text{CaF}_2$ ), которые хорошо растворяют окисную пленку при пайке [5].

Таблица 2.5. Высокотемпературные фторборатные флюсы (ГОСТ 23178-78).

Компоненты	Содержание (массовые доли), %	Температурный интервал активности, °С	Назначение и характеристика
Бура обезвоженная $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	18-20	800-1200	Пайка конструкционных и коррозионно – стойких сталей, жаропрочных сталей
Борный ангидрид $\text{B}_2\text{O}_3$	65-67		
Фтористый кальций $\text{CaF}_2$ (флюс ПВ 200)	14-16		
Бура $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	11-13	800-1200	Пайка конструкционных и коррозионно – стойких сталей, жаропрочных сталей
Борный ангидрид $\text{B}_2\text{O}_3$	76-78		
Фтористый кальций $\text{CaF}_2$	9,5-10,5		
Лигатура (Al 48%, Cu 48%, Mg 4%) (флюс ПВ 201)	0,9-1,1	850-1200	Пайка коррозионно – стойких и конструкционных сталей, жаропрочных сплавов, никеля и его сплавов. Флюс имеет широкий интервал активного действия
Бура $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	7-8		
Борная кислота $\text{H}_3\text{BO}_3$	39-41		
Фтористый кальций $\text{CaF}_2$	2-3		
Толченное стекло	47,7-51,8		
Лигатура (Al 48%, Cu 48%, Mg 4%)	0,2-0,3		

### 3 Методика проведения и результаты экспериментов

В результате проведения анализа было установлено, что наиболее перспективно для соединения рассмотренной конструкции можно считать применение технологического процесса пайки.

В качестве припоев наиболее целесообразно, с учетом спец. условий эксплуатации изделия, можно использовать припой систем Pd–Ni–Cr–Si (ПЖК – 1000), Pd–Ni–Cr–Ge, Pd–Ni–Cr–B.

Однако высокотемпературная пайка тонкостенных элементов конструкций, выполненных из коррозионностойких сталей и сплавов на основе никеля, является относительно сложным технологическим приемом [22, 23]. В данном случае приходится сталкиваться с рядом трудностей, связанных, с одной стороны, с необходимостью обеспечения высокого уровня смачиваемости материалом припоя поверхностей соединяемых элементов конструкции, а с другой – такого рода взаимодействие должно быть ограничено зоной диффузионного взаимодействия, которая, в свою очередь, должна быть достаточной для обеспечения требуемого уровня прочностных характеристик паяного соединения. Кроме требований к природной сущности припоя, его физико – химическим свойствам, задаваемым, прежде всего, химическим составом, крайне важным является решение вопросов о равномерной и точно задаваемой дозировке припоя и исключении образования пористости в зоне паяного шва из – за использования полимерного связующего в случае лент, получаемых из порошкового припоя [24]. Одним из полуфабрикатов припоев, применяемых для высокотемпературной пайки, сочетающим высокую степень структурно – химической однородности при прецизионно задаваемой толщине, а следовательно, обеспечивающим точную дозировку, является припой в виде быстрозакаленных лент. В этой связи перспективно использование ленточного припоя марки ВПр51, предназначенного для пайки тонкостенных элементов

конструкций авиационной техники (теплообменники, сотовые конструкции), выполненных из коррозионностойких сталей и сплавов на основе никеля [25].

Аморфные металлические ленточные припои на основе никеля обладают уникальными физико – химическими свойствами: идеальной структурной и химической однородностью, равнотолщинностью, пластичностью при многократном изгибе [26 – 31]. Кроме обеспечения возможности получения высокотемпературного припоя в виде быстрозакаленных лент, т. е. склонности к образованию необходимого для обеспечения основных технологических свойств полуфабриката припоя количества аморфной фазы [32, 33], его состав также должен удовлетворять целому ряду требований: обладать физико-химическими свойствами, обеспечивающими необходимый уровень смачиваемости и растекаемости, а также низкой эрозионной активностью по отношению к основному материалу [25, 34 – 36]. В итоге полученная композиция, будучи полученной в виде аморфной (быстрозакаленной) ленты, может найти свое применение уже в качестве армирующего элемента композиционного материала [37] или войти в состав материалов функционального назначения [38].

В настоящее время перспективным направлением в области разработки композиций припоев, предназначенных для пайки тонкостенных элементов конструкций из нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов, является создание припоев на основе никеля. Задача повышения жаропрочности (способности материала выдерживать высокие напряжения при температурах эксплуатации) паяных соединений решается благодаря сложному легированию припоев и проведению длительной термической обработки соединений. Наиболее часто применяют хром, обеспечивающий жаростойкость (способность сопротивляться химическому разрушению поверхности в условиях эксплуатации) и стойкость к высокотемпературной солевой коррозии (ВСК), которая наиболее опасна в температурном диапазоне 760 – 1000°С. Введением в припой таких элементов, как молибден, вольфрам,

тантал, алюминий и титан, достигают повышения жаропрочности; введением кобальта – пластичности паяных соединений. Молибден, вольфрам и тантал предназначены для твердорастворного, а алюминий и титан – для дисперсионного упрочнения. По этому принципу созданы многие отечественные и зарубежные припои. Особый интерес представляют эвтектические сплавы, обладающие низкой температурой ликвидус, высокой жидкотекучестью, которые хорошо смачивают поверхность паяемых материалов и менее склонны к образованию ликваций и усадочных пор.

Представляет интерес выявить особенности формирования структуры и свойств соединения при исследовании аморфных припоев в сравнении с традиционными [35,40].

### 3.1 Особенности формирования структуры и свойств паяных соединений, выполненных припоем ПЖК-1000

Известен припой ПЖК-1000, который используют в промышленности для пайки узлов высокотемпературного применения. С использованием этого припоя были изготовлены образцы для испытаний на кратковременную прочность при растяжении при 20 и 550°C и на длительную прочность. Пайка образцов проходила при температуре 1230°C, что несколько ниже рекомендуемой (1250°C) для этого припоя [5].

Была поставлена задача за счет корректировки состава снизить температуру пайки, стабилизировать показатели прочности и, что тоже очень важно, повысить пластичность сплава, прокатка которого протекает с большими трудностями. Опробовано два пути: изменение легирования твердого раствора и замена элемента, образующего с палладием эвтектику. В припое ПЖК-1000 таким элементом является кремний, который не растворяется в палладии, но образует эвтектику с ним при 4 мас. % (примерно 810°C). При этом по перитектическим реакциям образуется три

интерметаллида  $\text{Pd}_5\text{Si}$ ,  $\text{Pd}_9\text{Si}_2$ ,  $\text{Pd}_3\text{Si}$  при температурах 810, 823 и 1045°C соответственно [39].

Легирование палладия германием вместо кремния выглядит гораздо предпочтительнее. При 775°C растворимость германия в палладии составляет примерно 2 % и практически отсутствует при 200°C. Таким образом, нет оснований опасаться охрупчивания при легировании германием в этих пределах, и в то же время можно ожидать упрочнения твердого раствора на основе палладия при охлаждении.

С никелем кремний образует твердый раствор (примерно до 5 %) при 700°C, так что можно ожидать некоторое увеличение растворимости кремния при легировании палладия никелем. В то же время растворимость германия в никеле составляет примерно 12 % при 200°C, что свидетельствует о его предпочтительности. Растворимость германия в хроме также несколько выше, чем кремния.

Следовательно, германий как легирующий элемент можно применять в сплавах системы  $\text{Pd-Ni-Cr-Si}$  в значительно больших количествах, не вызывая охрупчивания, а, значит, эти сплавы должны лучше поддаваться обработке давлением с целью получения фольг малой толщины.

Для создания припоя со структурой твердого раствора может быть использована система  $\text{Co-Pd}$ .

На диаграмме этой системы присутствует минимум при более низкой температуре, чем в системе  $\text{Ni-Pd}$ , причем диапазон концентраций, в котором интервал плавления отсутствует, шире. При этом в интересующем нас интервале плавления какие-либо превращения не отмечены, т. е. на первый взгляд это более благоприятная диаграмма. Более того, учитывая неограниченную растворимость никеля и кобальта, можно ожидать, что может быть благоприятной и частичная замена никеля кобальтом.

Из этого следует, что интерес представляет исследование влияния возможной замены никеля кобальтом на структуру и способность к прокатке и влияние концентрации германия на те же параметры.



На примере никелевого сплава и припоев на базе системы Ni–Pd выявим возможность получения паяных жаропрочных соединений с высоким уровнем статической кратковременной (при комнатной и повышенной температуре), а также длительной прочности (при повышенной температуре и разном значении нагрузки).

В качестве припоев для пайки хромо-никелевого сплава использовали следующие материалы: промышленный припой ПЖК-1000 (система Pd–Ni–Cr–Si) (припой № 1), а также экспериментальные припои на базе систем Pd–Ni–Co–Cr–Si (№ 2), Pd–Ni–Cr–Ge (№ 3) и системы Pd–Ni–Cr–B (№ 4).

Экспериментальные припои применяли в виде прокатанных фольг толщиной около 50 мкм, стандартный припой толщиной около 100 мкм, № 4 — в виде ленты (30...50 мкм), полученной методом сверхбыстрой закалки. Для проведения металлографических исследований и изучения механических характеристик паяных соединений изготавливали стыковые паяные соединения. Припой в виде фольги укладывали в зазор.

Проведенные исследования паяных стыковых и тавровых образцов показали, что при температуре 1250°C припои № 1–3 имеют высокую жидкотекучесть и хорошо растекаются по подложке из хромо-никелевого сплава. Отмечено вытекание припоя из паяного зазора и растекание его по поверхности паяемого материала. При данной температуре галтели не образовывались, визуально наблюдалась рыхлость паяных швов (рис. 3.1, а).

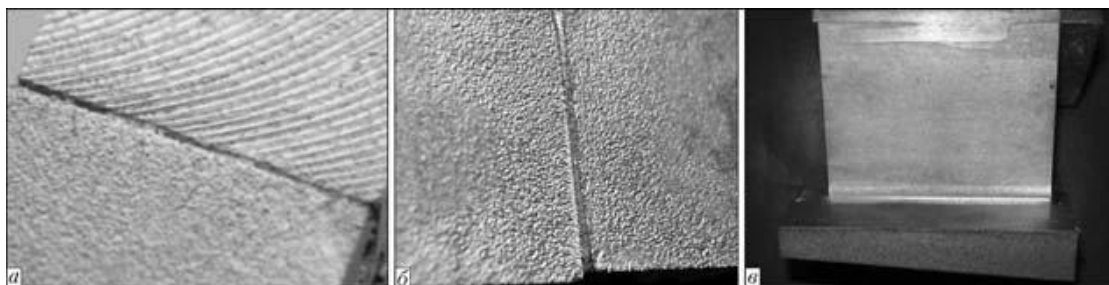


Рисунок 3.1 – Внешний вид стыковых паяных соединений, полученных соответственно при  $T_{\text{п}} = 1250, 1230^{\circ}\text{C}$  (а, б), и таврового соединения, полученного при  $T_{\text{п}} = 1230^{\circ}\text{C}$  (в).

Режимы пайки отработывали на стыковых и тавровых образцах. Снижение температуры пайки при изготовлении стыковых соединений с помощью припоев № 1, 2 до 1230°C, припоя № 3 до 1210...1230°C способствовало формированию галтелей минимальных размеров, эрозия основного металла отсутствовала (рис. 3.1, б). При пайке тавровых соединений наблюдалось хорошее формирование тонких плотных галтельных участков (рис. 3.1, в).

Структура паяных швов однородная (рис. 3.2, а), никель равномерно распределяется в основном металле и в паяном шве (рис. 3.2, в), количество палладия плавно увеличивается по ширине паяного шва от основного металла к центральной части шва (рис. 3.2, б), количество хрома несколько больше в основном металле (рис. 3.2, г).

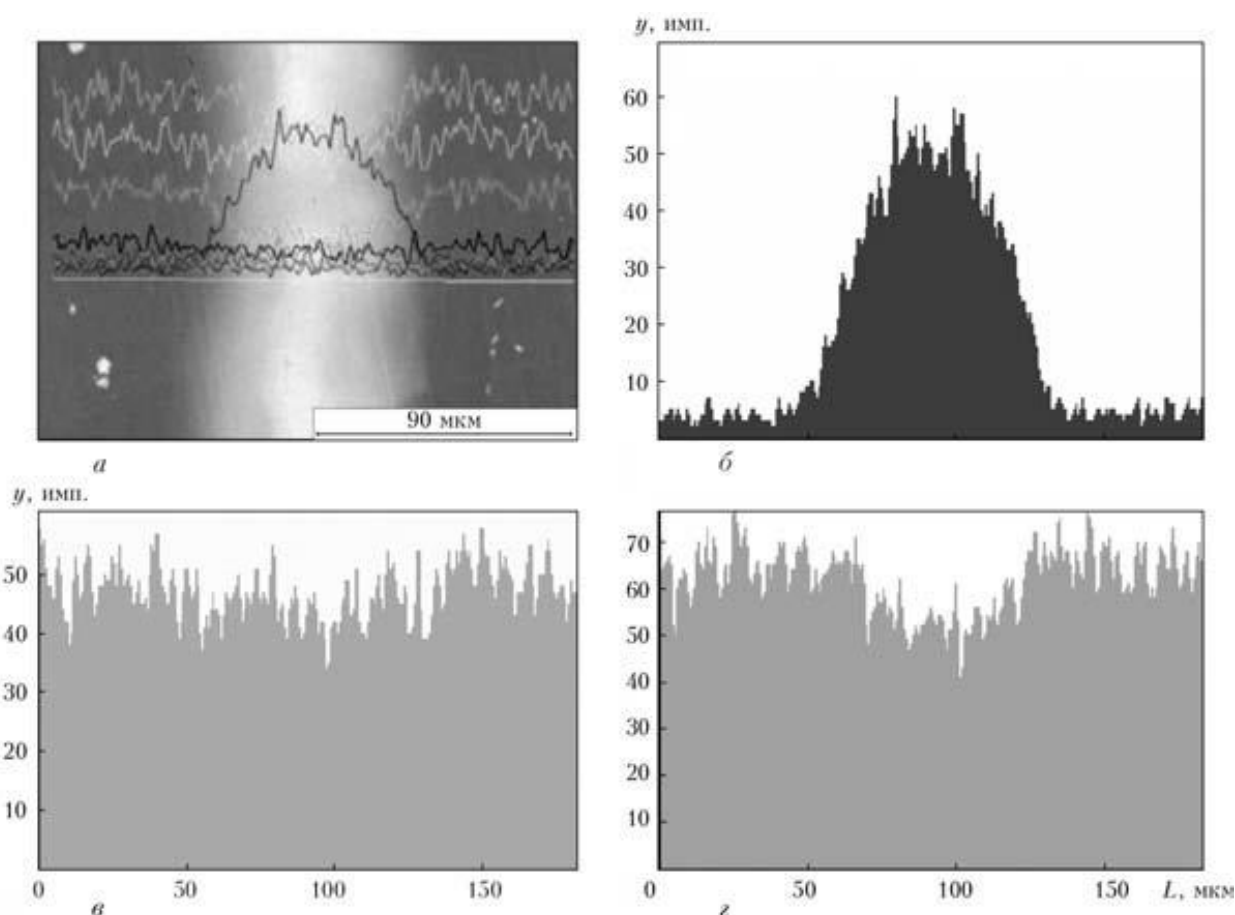


Рисунок 3.2 – Микроструктура паяного шва (а) и распределение палладия (б), никеля (в), хрома (г) в нем.

Для проведения кратковременных испытаний на растяжение при комнатной температуре использовали разрывную машину ИМЧ-30. Длительные испытания проводили с помощью машины МП-3. При длительных испытаниях образцы нагревали до 550°С, выдерживали 2 ч, затем прилагали требуемую нагрузку.

Результаты кратковременных испытаний паяных соединений на растяжение при комнатной температуре показали, что все исследуемые припои обеспечили высокую прочность паяным соединениям (от 1080 до 1310 МПа). Разрушение паяных соединений происходило по основному металлу. Максимальные средние значения прочности на растяжение (1292,5 МПа) получены при использовании припоя № 1. При увеличении времени пайки на 5 мин происходит повышение средней прочности на растяжение при использовании припоев № 1 и 3 соответственно на 2,7 и 4,7 % и для припоя № 3 составляет 1290 МПа. Припой № 2 обеспечил довольно стабильные результаты прочности, но на более низком уровне (1210 МПа), независимо от времени пайки.

Таблица 3.1. Кратковременная прочность на растяжение паяных соединений хромо-никелевого сплава при комнатной и повышенной температуре

№ припоя	Температура пайки, °С	Время пайки, мин	Прочность на растяжение (МПа) при температуре испытаний, °С	
			20	550
1	1230	5	1275	980
1	1230	10	1310	1060
2	1230	5	1210	950
2	1230	10	1210	970
3	1230	5	1190	Не исп.
3	1230	10	1260	1030
3	1220	10	1290	1000
4	1080	90	1230	685
4	1085	120	1080	880

Легирование припоя системы Pd–Ni–Cr–Si кобальтом улучшает пластичность паяных соединений примерно в два раза, о чем свидетельствуют значения относительных удлинений (15,2...16 %) и сужений (18...19,7 %). Высокие значения пластичности, соответственно относительного сужения (22,5 %) и удлинения (10 %) получены при использовании опытного припоя №3.

Тенденция распределения прочностных свойств между применяемыми припоями практически сохранилась при высокотемпературных испытаниях, которые проводили при температуре 550°C. Средняя прочность на разрыв при пайке припоями № 1 и 3 примерно одинаковая, соответственно 1020 и 1015 МПа. Более низкие средние значения получены при использовании припоев № 2 (960 МПа) и № 4 (783 МПа). Минимальные значения прочности соединений, полученных с помощью припоя системы Pd–Ni–Cr–B, обусловлены наличием бора, который характеризуется малой растворимостью в никеле. Во время изотермической пайки он диффундирует из шва в паяемый металл и выделяется по границам зерен основного металла в виде боридов, что отрицательно влияет на прочностные свойства.



Рисунок 3.3. Разрывная машина Zwick/Roell



Рисунок 3.4. Машина для испытаний на длительную прочность  
NorTest CREEP TC

Максимальную пластичность при температуре 550°C обеспечивает припой, легированный кобальтом, относительное удлинение паяных образцов, полученных при его использовании, находится в пределах 10...80 %.

Пластичность паяных соединений, полученных с помощью опытного припоя, несколько ниже и составляет 4...12 %.

При испытаниях на длительную прочность при температуре 550°C и напряжении 785 МПа образцы разрушались по основному металлу при пайке припоями № 1 после 29 ч и № 2 после 75 ч (рис. 3.5), а также по металлу шва, паяного припоями № 2–4 (рис. 3.6).



Рисунок 3.5. Разрушение паяных образцов после испытаний на длительную прочность.

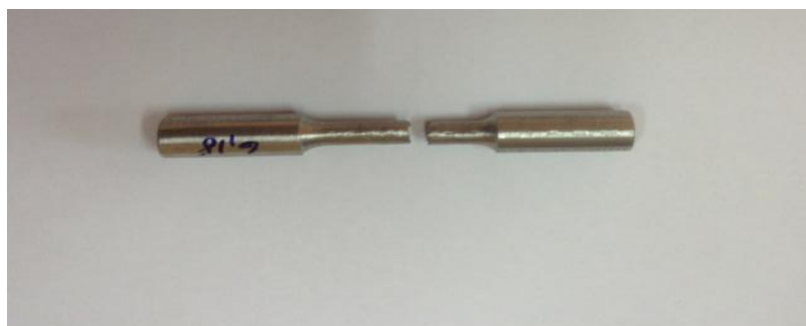


Рисунок 3.6. Разрушение паяных образцов после испытаний на длительную прочность.

Лучшие результаты показали паяные соединения, полученные с помощью опытного припоя № 3 (рис. 3.7). Из четырех образцов два разрушились после 42, 60 ч испытаний. Образцы № 9 и 10 не разрушились соответственно после 112 и 130 ч (рис. 3.7), что превысило требуемый рабочий ресурс более чем в два раза [40].

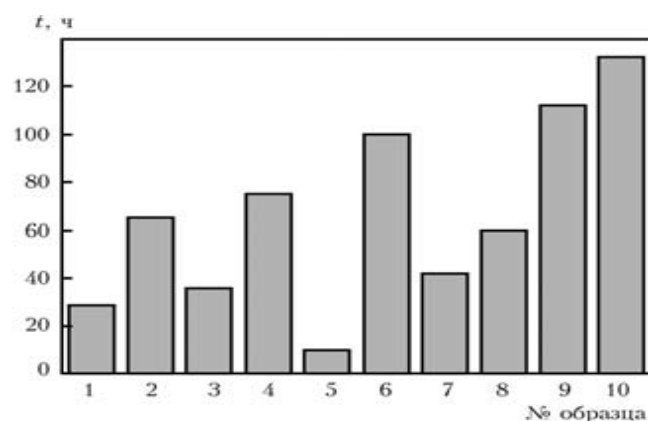


Рисунок 3.7. Длительная прочность паяных соединений, полученных с использованием промышленного припоя Pd–Ni–Cr–Si (образцы 1, 2) и опытных припоев Pd–Ni–Co–Cr–Si (3, 4), Pd–Ni–Cr–B (5, 6), Pd–Ni–Cr–Ge (7–10).

### 3.2 Особенности формирования структуры и свойств паяных соединений, выполненных припоем ВПр51

Оценку свойств припоя производили на основании изучения особенностей его поведения при пайке тонкостенных элементов конструкций, выполненных из коррозионностойкой стали. В данном случае важным является подбор оптимальных режимов пайки – температуры и продолжительности выдержки, которые определяют взаимодействие материала припоя с материалом соединяемых деталей.

Для этой цели проведена серия экспериментов с последовательным изменением температуры пайки образцов в вакууме, состоящих из пластин паяемого материала с размещенным на их поверхности пакетом из нескольких слоев аморфного припоя. Перед пайкой поверхность пластин тщательно зачищали шлифовальной бумагой номеров 200, 400 и 600 с доведением поверхности полировкой шлифовальной бумагой с зерном 0,63 мкм. Затем поверхность обрабатывали смесью бензина и спирта в соотношении 3:1 (объемных частей). Количество припоя оценивали по толщине используемых лент припоя.



В ходе эксперимента контролировали следующие параметры: смачиваемость, которую оценивали по углу смачивания; растекаемость, которую, в свою очередь, измеряли по диаметру капли на поверхности пластины, а также степень эрозионного взаимодействия материала припоя с паяемым материалом.

Для определения предела прочности паяного соединения изготовили стандартные образцы для испытаний с диаметром рабочей зоны 5 мм из прутковой заготовки коррозионностойкой стали.

Определение прочностных характеристик проводили на испытательных машинах Instron (Англия), FPZ-100/1 (Германия) при комнатной (20°C) и повышенной температуре (600°C).

Способность припоя заполнять зазоры малой величины под действием капиллярных сил, называемую капиллярностью, проверяли следующим образом. На поверхность пластины из коррозионностойкой стали указанной марки укладывали пластину прямоугольной формы из стали той же марки, но меньшего размера и закрепляли фольгой из коррозионностойкой стали посредством точечной сварки. Строго контролировали зазор (на свету) между пластинами, который не превышал  $50 \pm 5$  мкм. Затем у кромки второй пластины устанавливали пакет аморфного ленточного припоя. Далее проводили пайку по выбранному на этапе определения смачиваемости и растекаемости режиму и изготавливали продольный шлиф, по которому определяли степень заполнения припоем заданного зазора, – тем самым подтверждалась смачиваемость паяемого материала припоем и дополнительно оценивалась величина эрозионного взаимодействия материала припоя с соединяемым материалом (рис. 3.8).

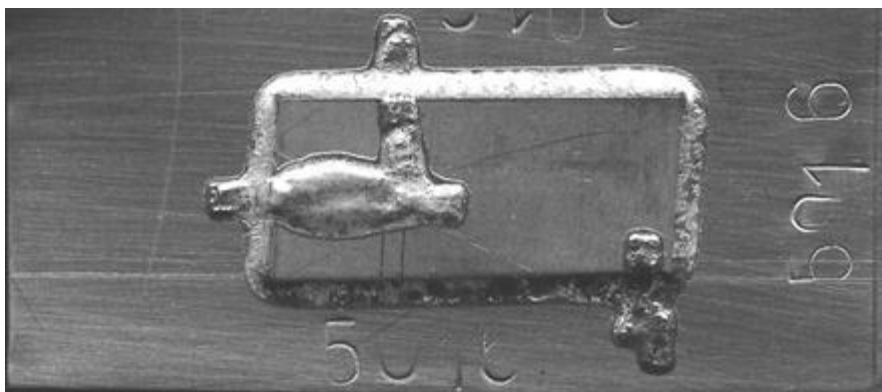


Рисунок 3.8. Проба на капиллярность (заполнение зазором)  
припоя марки ВПр51

При металлографическом исследовании микрошлифов паяных соединений установлено следующее: степень эрозии материалом припоя ВПр51 не превышает 2–3%, припой образует малые углы смачивания и хорошо заполняет капиллярный зазор (рис. 3.9).

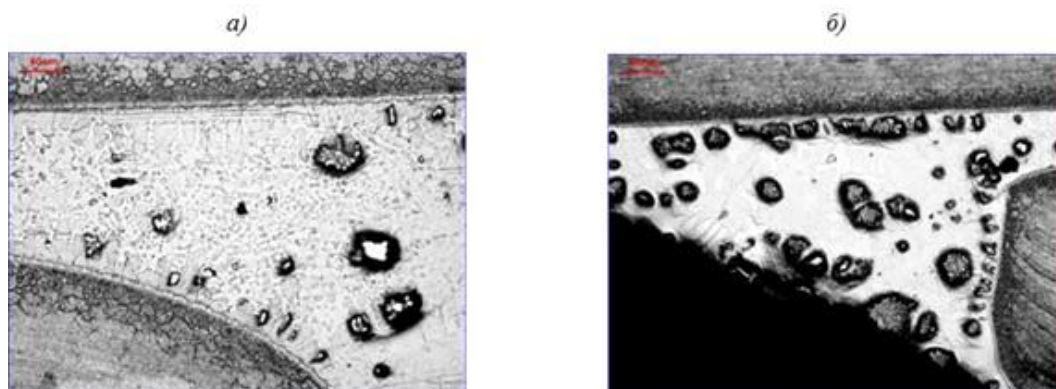


Рисунок 3.9. Входная (а –  $\times 100$ ) и выходная (б –  $\times 200$ ) галтели паяного шва  
образца из коррозионностойкой стали

Установлено также, что в паяном шве с зазором 90 – 100 мкм (рис. 3.10) образована доэвтектическая структура, имеющая включения темного цвета. Шов состоит из гамматвердого раствора, эвтектики и темных включений (рис. 3.11, а). По мере уменьшения зазора (шов толщиной 50 мкм) эвтектика сначала становится прерывистой (рис. 3.11, б), а затем вырождается. При

величине зазора, равной 40 мкм, шов состоит только из гамма – твердого раствора (рис. 3.11, в).

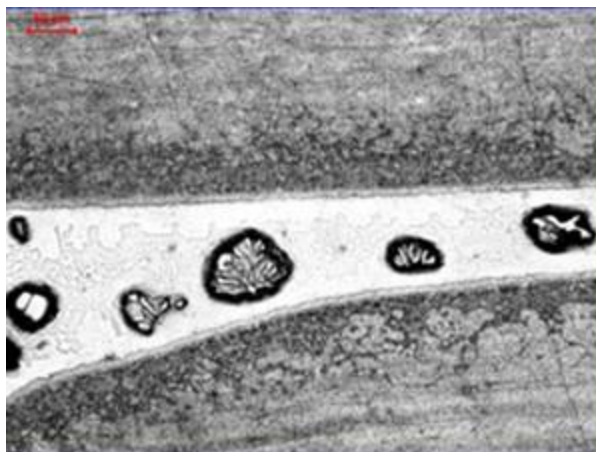


Рисунок 3.10. Паяный шов ( $\times 200$ ) со стороны входной галтели с зазором 90–100 мкм

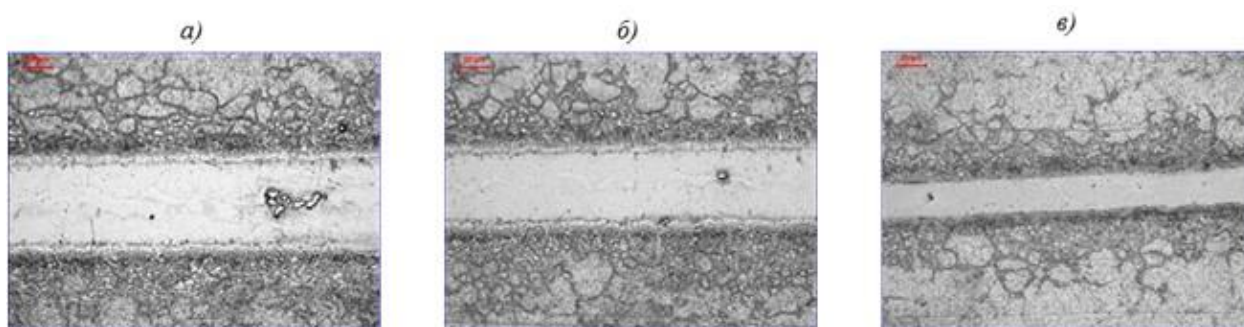


Рисунок 3.11. Изменение микроструктуры ( $\times 500$ ) паяного соединения по шву (а–в)

Для образцов из коррозионностойкой стали для испытания на срез и определения предела прочности выбран следующий режим: температура 1040–1050°C с выдержкой 15–20 мин и охлаждением с печью до 100°C в вакууме. Пайку проводили в вакуумной печи, контроль температуры осуществляли при помощи вольфрамово-рениевой термопары с фиксированием значений на цифровом вольтметре.

При испытании образцов из коррозионностойкой стали, паянных припоем марки ВПр51, получены следующие результаты (табл. 3.2 и 3.3).

Таблица 3.2 – Результаты механических испытаний на срез образцов из коррозионностойкой стали толщиной 1,5 мм, паянных припоем марки ВПр51 (аморфная лента) на основе никеля

Условный номер образца	Геометрические размеры нахлестки		Площадь нахлестки, мм2	Нагрузка при разрушении, кН	Предел прочности, ширина, мм длина, мм МПа
	ширина, мм	длина, мм			
Температура испытания 20°С					
1	9,35	0,95	8,88	5,02	554
2	9,55	0,97	9,26	5,39	570
3	9,67	0,93	8,99	4,69	512
Температура испытания 600°С					
4	9,55	0,97	9,26	3,20	339
5	9,8	0,93	9,11	3,11	334
6	9,7	0,95	9,23	3,16	335
7	9,8	0,94	9,21	3,18	338

Таблица 3.3 – Результаты механических испытаний на растяжение образцов, паянных встык припоем марки ВПр51 (аморфная лента) на основе никеля

Условный номер образца	Диаметр образца, мм	Нагрузка при разрушении, кН	Предел прочности, МПа
Температура испытания 20°С			
1	4,96	1185	601
2	4,97	1136	574
3	4,95	1168	595
Температура испытания 600°С			
4	4,97	587	297
5	4,97	520	263
6	4,97	602	304

Следует отметить, что полученные при комнатной температуре значения прочности паяного соединения при испытании на срез и при определении предела прочности при растяжении находятся на уровне значений прочности для основного материала коррозионностойкой стали. При повышенной температуре (600°С) прочность паяного соединения составила 75 – 80% от прочности основного материала, что является допустимым при применении

пайки для несущих элементов тонкостенных конструкций (сотовых панелей, ЗПК, теплообменников). Для сравнения приведем справочные данные. Так, предел прочности при растяжении стали данной марки составляет 610 – 647 МПа для прутков и образцов в виде листовой заготовки в состоянии поставки при комнатной температуре. В отожженном состоянии прочность снижается до уровня 510 – 539 МПа. При температуре 600°С прочность основного материала составляет 392 МПа.

Приведенные в таблицах 3.2 и 3.3 сниженные значения предела прочности паяного соединения при повышенной температуре в сравнении со значением предела прочности основного материала, по – видимому, могут быть объяснены наличием в зоне разрушения областей с крупнозернистой структурой, в которой имеют место зоны термического влияния.

При изучении характера разрушения образцов из коррозионностойкой стали установлено наличие пластичного характера разрушения, о чем свидетельствует мелкоямочный рельеф (рис. 3.12), с образованием незначительного удлинения образца и разрушением по галтели паяного шва образцов для определения предела прочности и по поверхности нахлестки образцов для определения прочности на срез при 20 С (при минимально допустимой нахлестке) [35].

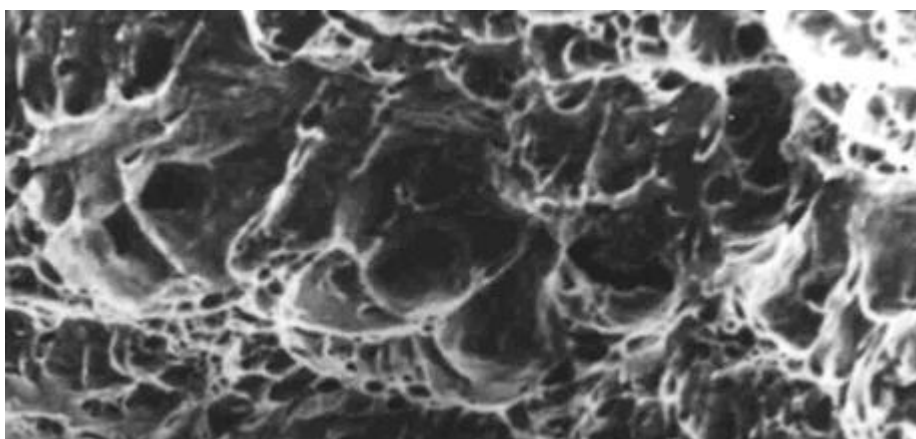


Рисунок 3.12. Поверхность излома образца при испытании на срез ( $\times 500$ )

#### 4 Анализ результатов и технические рекомендации

Проведенные исследования паяных стыковых и тавровых образцов показали, что при температуре 1250°C палладиевые припои имеют высокую жидкотекучесть и хорошо растекаются по подложке из хромо-никелевого сплава. Отмечено вытекание припоя из паяного зазора и растекание его по поверхности паяемого материала. При данной температуре галтели не образовывались, визуально наблюдалась рыхлость паяных швов. Снижение температуры пайки при изготовлении стыковых соединений с помощью припоев № 1, 2 до 1230°C способствовало формированию галтелей минимальных размеров, эрозия основного металла отсутствовала. При пайке тавровых соединений наблюдалось хорошее формирование тонких плотных галтельных участков. Структура паяных швов однородная, никель равномерно распределяется в основном металле и в паяном шве, количество палладия плавно увеличивается по ширине паяного шва от основного металла к центральной части шва, количество хрома несколько больше в основном металле.

Результаты кратковременных испытаний паяных соединений на растяжение при комнатной температуре показали, что все исследуемые припои обеспечили высокую прочность паяным соединениям. Разрушение паяных соединений происходило по основному металлу. При увеличении времени пайки происходит повышение средней прочности на растяжение.

Тенденция распределения прочностных свойств между применяемыми припоями практически сохранилась при высокотемпературных испытаниях. Минимальные значения прочности соединений, полученных с помощью припоя системы Pd–Ni–Cr–B, обусловлены наличием бора, который характеризуется малой растворимостью в никеле. Во время изотермической пайки он диффундирует из шва в паяемый металл и выделяется по границам зерен основного металла в виде боридов, что отрицательно влияет на прочностные свойства.

Следует отметить, что полученные при комнатной температуре значения прочности паяного соединения при испытании на срез и при определении предела прочности при растяжении находятся на уровне значений прочности для основного материала коррозионностойкой стали. При повышенной температуре (600°C) прочность паяного соединения составила 75–80% от прочности основного материала, что является допустимым при применении пайки для несущих элементов тонкостенных конструкций (сотовых панелей, ЗПК, теплообменников). Для сравнения приведем справочные данные. Так, предел прочности при растяжении стали данной марки составляет 610–647 МПа для прутков и образцов в виде листовой заготовки в состоянии поставки при комнатной температуре. В отожженном состоянии прочность снижается до уровня 510–539 МПа. При температуре 600°C прочность основного материала составляет 392 МПа [35,40].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Припой ВПр51 в виде аморфных лент – благодаря своим свойствам, таким как смачиваемость, растекаемость, капиллярность – позволяет ограничить эрозию основного материала на уровне 3–5% при сниженной до 1040–1080°C температуре пайки. При пайке тонкостенных элементов конструкций из коррозионностойких сталей значения прочности паяного шва при его испытании на срез составили ~ (510–570) и ~ (330–340) МПа при 20 и 600°C соответственно. Предел прочности образцов, паянных встык, составил ~ (575–600) и ~ (260–300) МПа при 20 и 600°C соответственно. Фрактографический анализ изломов паяных образцов показал мелкоячеистую структуру поверхности разрушения, характерную для пластичного излома. Полученные результаты свидетельствуют о возможности и перспективности применения припоя марки ВПр51 для пайки тонкостенных элементов, выполненных из коррозионностойких сталей [35].

1. Проведенные исследования паяных соединений жаропрочного хромо-никелевого сплава показали, что применение борсодержащего припоя Pd–Ni–Cr–В не позволяет получить требуемую прочность и пластичность паяных соединений как при комнатной, так и при повышенной температуре.

2. Установлено, что при определении кратковременной прочности на растяжение при комнатной температуре увеличение времени пайки (с 5 до 10 мин) приводит к повышению средней прочности на растяжение при использовании промышленного (№ 1) и опытного (№ 3) припоев соответственно на 2,7 и 4,7 %.

3. Определено, что максимальную кратковременную прочность на растяжение 1310 МПа (при  $T_{исп} = 20^\circ\text{C}$ ) получили при пайке жаропрочного хромо-никелевого сплава промышленным припоем на базе системы Pd–Ni–Cr–Si. Однако при испытаниях на длительную прочность паяные соединения имели недостаточный рабочий ресурс в интервале 29 – 60 ч.



4. Опытный припой Pd–Ni–Cr–Ge обеспечивает кратковременную прочность на разрыв на уровне основного металла 1230 – 1290 МПа и показывает стабильные результаты при испытаниях на длительную прочность при температуре 550°C и нагрузке 785 МПа. Паяные образцы не разрушались даже после 112 и 132 ч испытаний, что превысило требуемый ресурс более, чем вдвое [40].

Из проанализированных результатов можно предположить, что к нашему сплаву 45X25H35BC возможно применение технологии пайки в вакуумной печи типа СШВ – 8.12/13 ЭМ1 и припоя ВПр51.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бобков А.В., Глинка Н.Л., Попков В.А. Общая химия: учебник для бакалавров. М.: Юрайт. 2013. 898 с.
2. Snisar V.V., Demchenko E.L. and Ivanchenko E.V. CHALLENGING TECHNOLOGIES for HIGH-STRENGTH STEEL WELDING WITHOUT PREHEATING and HEAT TREATMENT. The Paton Welding Journal. №11. 2000. P.37.
3. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
4. Лашко С.В. Пайка металлов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.
5. Петрунин И.Е. Справочник по пайке. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 480 с.
6. Петрунин И.Е., Лоцманов С.Н., Николаев Г.А., Пайка металлов. 2-е изд., - М.: Металлургия, 1973. 280 с.
7. ОАО Вниинетемаш. ТУ 1333 – 85 – 00220302 – 2004. Трубы реакционные из жаропрочных сталей и сплавов для нефтехимического высокотемпературного оборудования: уст. письмом от 01.09.2002. Изд – во стандартов, 2004. 21с.
8. Реакционная система печи парового риформинга: пат. RU 2438967/С01В3/38 Горлов Владимир Федорович (RU), Кривов Андрей Викторович (RU), Буканин Александр Владимирович (RU). № 2438967; заявл. 26.05.2010 ; опубл. 10.01.2012.(Россия). 5с.
9. СССР. Госстандарт. ГОСТ 17325-79. Пайка и лужение. Основные термины и определения: уст. приказом №3914 от 11.10.1979// Консультант плюс: справочно-правовая система.
10. СССР. Госстандарт. ГОСТ 12836-67. Заглушки фланцевые: уст. приказом №13/IV от 01.01.1969// Консультант плюс: справочно-правовая система.

11. СССР. Минтяжмаш. ОСТ 26-11-07-85. Заглушки фланцевые стальные: утв. приказом №1 от 01.01.1986 // Консультант плюс: справочно-правовая система.

12. Госгортехнадзор России. ОСТ 26.260.3-2001. Сварка в химическом машиностроении. Основные положения: утв. приказом № 184 от 19.11.2001 // Консультант плюс: справочно-правовая система.

13. СССР. Госстандарт. ГОСТ 23619-79. Материалы и изделия огнеупорные теплоизоляционные муллитокремнеземистые стекловолоконные. Технические условия: утв. письмом № 1 от 01.01.1981 // Консультант плюс: справочно-правовая система.

14. Госгортехнадзор России. РД 03-606-03. Инструкция по визуальному и измерительному контролю: утв. приказом № 156 от 17.07.2003 // Консультант плюс: справочно-правовая система.

15. Госгортехнадзор России. ОСТ 26-5-99. Контроль неразрушающий. Цветной метод контроля сварных соединений, наплавленного и основного металла: утв. письмом № 12-42/344 от 05.04.2001 г. // Консультант плюс: справочно-правовая система.

16. СССР. Госстандарт. ГОСТ 19249-73. Соединения паяные. Основные типы и параметры: утв. постановлением N 2641 от 04.12.1973 // Консультант плюс: справочно-правовая система.

17. Румянцев С. В., Добромыслов В. А., Борисов О. И. Неразрушающие методы контроля сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1976. 335 с.

18. Ремизов А. Л. Ультразвуковая дефектоскопия паяных соединений строительных металлоконструкций / В сб.: Пайка 2000. Тольятти, 2000. С. 89 - 95.

19. Бакутин В. Н., Заика Ж. А., Карпов В. И. Определение дефектов пайки радиационным методом // Дефектоскопия. 1972. № 6. С. 75 – 80.

20. Седых С.А. Технологический процесс и оборудование для сварки трубы реакционной. ТГУ. Тольятти. 2016.

21.Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Науч.-технич. журн. Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.

22.Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Науч.-технич. журн. Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.

23.Аморфные металлические припои / Столянков Ю.В., Лукин В.И., Рыльников В.С. // Тез. докл. межотр. науч.-практич. конф. «Проблемы создания новых материалов для авиакосмической отрасли в XXI веке». М.: ВИАМ, 2002. С. 48–49.

24.Лукин В.И., Столянков Ю.В., Рыльников В.С., Щербаков А.И. Пайка аморфными припоями // Науч.-технич. журн. Авиационные материалы и технологии. 2002. №4. С. 96–102.

25.Быстрозакаленные жаропрочные припои на основе титана и никеля/ Лукин В.И., Рыльников В.С., Столянков Ю.В., Щербаков А.И. // Тез. докл. междунар. науч.-технич. конф. «Актуальные вопросы авиационного материаловедения» М.: ВИАМ, 2007. С. 25–26.

26.Ковнеристый Ю.К. Физикохимия аморфных (стеклообразных) металлических материалов. М.: Металлургия, 1987. 328 с.

27.Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. М.: Металлургия, 1987. 328 с.

28.Ковнеристый Ю.К., Осипов Э.К., Трофимова Е.А. Физико-химические основы создания аморфных металлических сплавов. М.: Наука, 1983. 145 с.

29.Аморфные металлические сплавы: под ред. Ф.Е. Люборского: пер. А. М. Глезер. М.: Металлургия, 1987. 584 с.

30.Металлические стекла: под ред. Д.Д. Гилмана и Х.Д. Лими: пер М.А.Дроздовой. М.: Металлургия, 1984. С. 12–39.

31.Столянков Ю.В., Алексашин В.М., Антюфеева Н.В. К вопросу об оценке склонности металлических систем к стеклообразованию (обзор) // Электронный

науч.-техн. журн. Труды ВИАМ. 2015. №7. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>.

32.Столянков Ю.В., Алексашин В.М., Антюфеева Н.В., Щеглова Т.М. Оценка стеклообразующей способности металлической системы на основе никеля типа «металл–металлоид» //Авиационные материалы и технологии. 2016. №1 (40). С. 66–71.

33.Афанасьев-Ходыкин А.Н., Лукин В.И., Рыльников В.С. Высокотехнологичные полуфабрикаты жаропрочных припоев (ленты и пасты на органическом связующем) // Электронный науч.-техн. журн. Труды ВИАМ. 2013. №9. С. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>.

34.Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // Тр. Всерос. науч.-практич. конф. «Сварка и безопасность». Якутск. ИФТПС СО РАН, 2012. С. 21–30.

35.Столянков Ю.В., Лукин В.И., Афанасьев – Ходыкин. Пайка тонкостенных элементов конструкции аморфным ленточным припоем ВПр51 // Электронный науч.-техн. журн. Труды ВИАМ. 2018. №2. С. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения 06.04.2018).

36.Рыльников В.С., Лукин В.И. Припои, применяемые для пайки материалов авиационного назначения // Электронный науч.-техн. журн. Труды ВИАМ. 2013. №8. С. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения 17.04.2018).

37.Столянков Ю.В., Антюфеева Н.В., Раскутин А.Е., Каримова С.А. Исследование возможности создания слоистых металлополимерных композиционных материалов с использованием тонколистовых аморфных сплавов // Электронный науч.-техн. журн. Труды ВИАМ. 2015.№4. С. 33.

38.Столянков Ю.В., Гуляев И.Н., Алексашин В.М., Антюфеева Н.В. Аморфные металлические материалы в составе пьезоэлектрических слоистых элементов-актюаторов // Электронный науч.-техн. журн. Труды ВИАМ. 2015. №4. С. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения 20.04.2018).

- 39.Лякишев Н. П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник. В 3 т.: Т.3 – М.: Машиностроение, 1999. — 880 с.
- 40.Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Бутенко Ю. В., Малый А. Б., Прочность паяных соединений жаропрочного никелевого сплава Инконель 718, полученных с помощью палладиевых припоев // Автоматическая сварка: науч.-технич. журн. 2010. №11. С 17 – 21.
- 41.Контроль качества пайки / Седых С.А. // Сборник трудов студенческой конференции. ТГУ. Тольятти – 2018.
- 42.Особенности пайки высоколегированных хромо – никелевых сплавов / Седых С.А.// Сборник статей по итогам межд. научно–практич. конф. «Инновационные технологии – 2018». – г.Саратов 17-21 апр.2018. г.Стерлитамак. АМИ, 2018. – С 76 – 78.
- 43.Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: МИСИС, 2005. – С 320.
- 44.Ярушин С.Г. Технологические процессы в машиностроении. М., 2011. 564с. [Электронный ресурс] : URL:[http://studme.org/36398/tovarovedenie/tehnologicheskie\\_protsestry\\_svarki](http://studme.org/36398/tovarovedenie/tehnologicheskie_protsestry_svarki).(дата обращения 21.01.2018)
- 45.Вакк Г., Семенов В.П. Каталитическая конверсия углеводородов в трубчатых печах: учеб пособие для рабочих профессий. М. НИИТЭХИМ. 1979. 70с. [Электронный ресурс] :URL:<http://lib.podelise.ru/docs/2149/index-2856/html?page=3>. (дата обращения 07.03.2018).
- 46.Mikhoduj L.I. and Kasatkin S.B. PREHEATING AND POSTWELD HEATING IN WELDING HIGH-STRENGTH ALLOYED STEELS. The Paton Welding Journal. № 01. 2000.P.20.
- 47.Иванов С.Г.Технология конструкционных материалов: учеб. пособие. Омск. ОмГТУ. 2007. 176с. URL: <http://allrefs.net/c1/4awjz/p33/>. (дата обращения 07.03.2018).

48.Ryabov V.R. PRODUCTION AND WELDING OF HIGH-TEMPERATURE COMPOSITE MATERIALS (Review). The Paton Welding Journal. № 01. 2000.P.12.

49.Makhnenko V.I. and Makhnenko O.V. DEVELOPMENT OF CALCULATION PROCEDURES FOR ASSESSMENT OF ALLOWABLE DEFECTS IN WELDED JOINTS OF CRITICAL STRUCTURES. The Paton Welding Journal. № 09. 2000. P. 79.

50.Paton B.E. and Troitsky V.A. DEVELOPMENT OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF CRITICAL METAL STRUCTURES. The Paton Welding Journal. № 09. 2000. P. 95.

51.Меркулова, Г. А. Металловедение и термическая обработка цветных сплавов: учеб. пособие. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2008. – 312 с. URL:<http://bib.convdocs.org/v7983/?download=1>. (дата обращения 17.04.2018).

52.Филиппов М.А., Бараз Б.Р., Гервасьев М.А. Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений. Екатеринбург: Металлургия.2013.234с.

URL:<http://dlib.rsl.ru/rsl01006000000/rsl01006806000/rsl01006806130/rsl01006806130.pdf>. (дата обращения 06.05.2018).

53.Ермаков Б.С. Технология конструкционных материалов: учеб. пособие. С.– Петерб. Гос. ун-т низкотемператур и пищевых технологий. СПб. 2005.167с.