

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

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»
(наименование кафедры)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Технология и оборудование для пайки

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На тему: Исследование возможностей и разработка технологии бесфлюсовой пайки алюминия

Студент

Чумаев Н.А.

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

Краснопевцев А.Ю.

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы

д. т. н., профессор Б.Н. Перевезенцев

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

(личная подпись)

« » 20 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д. т. н., доцент В.В. Ельцов

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

(личная подпись)

« » 20 г.

Тольятти 2017 г

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1.Состояние вопроса.....	4
1.1. Алюминий и сплавы на основе алюминия. Паяемость. Свойства физико-химические. Особенности и способы пайки.....	4
1.2. Припой применяемы для процесса пайки алюминия и сплавов. Физико-химические свойства цинка. Припой на основе цинка. Физико- химические свойства цинка	10
1.3. Контактно-реактивная пайка. Контактное плавление и автовакуумная пайка.....	19
1.4. Задачи магистерской диссертации.....	30
2.Методика исследований.....	32
2.1. Исследование сплавов системы Al-Zn.....	32
3. Результаты исследований.....	61
Заключение.....	88
Список литературы.....	90

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время увеличивается объем применения алюминия и сплавов на основе алюминия. Основные достоинства алюминия это небольшая плотность (2,7 г/см³), высокие характеристики прочности, хорошую тепло- и электропроводность, технологичность, коррозионную стойкость. Основными потребителями являются такие отрасли как авиация, судостроение, автомобилестроение, строительство, железнодорожный транспорт, нефтяная и химическая промышленность. Такой материал широко применяется для изготовления корпусов судов, рамы и емкостей железнодорожных вагонов, радиаторы охлаждения и т.д.

Исследования алюминиевых сплавов показали, что подплавление их под окисной пленкой и её разрушение возможны не со всеми элементами, образующими с паяемым металлом эвтектики. Пригодны только такие элементы, которые имеют с ним достаточное химическое сродство и образуют эвтектики, богатые алюминием (кремний, медь, магний, серебро, галлий) со сравнительно высокой температурой плавления (но не близкой к температуре плавления паяемого сплава).

При проработке возможностей бесфлюсовой пайки ранее были проведены эксперименты по возможности использования способа пайки электросопротивлением, также с использованием индукционного нагрева. В работе будут рассмотрены возможные способы бесфлюсовой пайки.

Цель работы: снизить трудоемкость и себестоимость изготовления конечного изделия из алюминия при бесфлюсовой пайке.

1. Состояние вопроса

1.1. Алюминий и сплавы на основе алюминия. Паяемость.

Свойства физико-химические сплавов на основе алюминия и алюминия.

Свойства алюминия зависят от степени чистоты. Чистый алюминий (99,996%) обладает плотностью (при температуре 20°C) 2698,9 кг/м³, $t_{пл}=660,24^{\circ}\text{C}$; $t_{кип}$ около 2500°C: коэффициент термического расширения (от 20° до 100°C) $23,86 \cdot 10^{-6}$; теплопроводность (при температуре 190°C) 343 Вт/м·К, удельная теплоёмкость (при температуре 100°C) 931,98 Дж/кг·К. Алюминий чистый имеет прочность ($\sigma_B=45$ МПа, $\sigma_{0,2}=22$ МПа) и пластичность ($\delta=50\div 65$ %). При осуществлении нагрева модуль упругости алюминия снижается достаточно с высокой скоростью, алюминиевые конструкции при диапазоне температур 250-300°C и выше теряют устойчивость. [39].

Алюминий имеет сродность к кислороду, на воздухе на поверхности образуется тонкая оксидная пленка Al_2O_3 , осуществляющая защиту металла от окисления и обеспечивающая высокой стойкость к коррозии. Алюминий имеет стойкость к атмосферной коррозии, морской и пресной воде, не вступает в взаимодействие с азотной кислотой (концентрированной или сильно разбавленной), с органическими кислотами, пищевыми продуктами. [41]

Особенности процесса пайки алюминия и сплавов на основе алюминия.

При изготовлении конструкций из алюминия и сплавов на основе алюминия можно использовать различные виды неразъемных соединений . Пайка является наилучшим способом соединения для большинства конструкций из алюминия и его сплавов.

Алюминий и его сплавы считаются трудно паяемыми материалами. Трудности пайки алюминиевых сплавов связаны прежде всего с физико-химическими свойствами алюминия и высокой стойкостью его оксида. Пайка алюминия имеет следующие особенности [19, 21, 45]:

- на поверхности алюминия присутствует тугоплавкий ($T_{пл}=2045^{\circ}\text{C}$), стойкий оксид, который показывает высокую химическую и термическую стойкость;
- металлургическое взаимодействие не желательно для алюминия и его сплавов;
- алюминий имеет высокую теплоемкость – в диапазоне температур 0-300 $^{\circ}\text{C}$ значение 0,953 кДж/кг $^{\circ}\text{C}$, поэтому при осуществлении процесса пайки изделий из алюминия с использованием местного нагрева требуются мощные источники теплоты для осуществления нагрева изделий, из-за этого образуется широкая зона разогрева и значительная деформация;

Исходя из выше, сказанного низкотемпературная пайка применяется крайне редко.

Большая категория компонентов припоев из алюминия: Cu, Zr, Mn, Mg, Ti, обладают с алюминием химическим сродством и образуют при взаимодействии химические соединения, входящие в эвтектики. Кремний как компонент припоя с алюминием образует сплав с пластичной простой эвтектикой.[19, 23, 48].

Деформированные алюминиевые сплавы

Для производства любых деталей, которые подвергаются внешнему воздействию, применяется не чистый алюминий, а сплавы на основе алюминия, которых существует большое количество.

Внедрение разных легирующих компонентов в алюминий меняет его свойства, а в некоторых случаях придает ему новые свойства. При разном легировании повышают прочность, твердость, приобретают жаропрочность и прочие свойства. При этом происходит и нежелательное изменение: снижается электропроводность, в множестве случаев уменьшается стойкость к коррозии, повышается плотность. За исключение можно принять легирование марганцем, который повышает стойкость к коррозии и снижает плотность, так как марганец легче, чем алюминий.

Основные легирующие элементы в различных деформируемых сплавах: медь, магний, марганец и цинк, в невысоких количествах вводят также кремний, железо, никель.

Для изготовления деформируемых сплавов в состав алюминий вводят в растворимые легирующие элементы, количество не должно превышать предел растворимости.

Деформируемые сплавы применяются в качестве облицовочных материалов, материалов конструкций в авиационной технике и т.д.

Способы процесса пайки алюминия и сплавов на основе алюминия

Процесс пайки алюминия и алюминиевых сплавов возможно производить массой доступных способов, в зависимости от типа производства.

На поверхности алюминия и сплавов на основе алюминия присутствует прочная двусоставная оксидная пленка. Способ подготовки поверхности зависит в большей степени от применяемых флюсов и припоев, а также состояния паяемого металла, технологии и оборудования. Подготовка поверхности проводится перед сборкой и пайкой, потому что на поверхности образовывается оксидная пленка толщиной менее 0,5 нм.

Наиболее простой способ удалить загрязнения с поверхности металла это механический способ. Данный способ позволяет удалить оксидные пленки различной конфигурации с поверхностей. Для механической очистки от оксидных пленок обычно применяют металлические щетки.

Возможно осуществлять промывку алюминия в разогретых растворах щелочей можно промывать в горячих щелочных растворах. Обезжиривание в растворах содержащих Na_2CO_3 , Na_2SiO_3 , NaOH , надежно удаляет загрязнения с поверхности большинства алюминиевых сплавов. Толстые слои оксидных пленок удаляют механическим и химическим способами в совокупности.

Использование химической очистки обуславливается потребностью очистки большого количества деталей с разнообразной конфигурацией конструкции. Химическая очистка экономически целесообразна, из-за стоимости компонентов.

Для очистки поверхности алюминия используют кислоты и щелочи(таблица 1).

Таблица 1. – Растворы применяемые для очистки алюминия [47].

Номер состава	Содержание компонентов, г/л	T, °C
1	$\text{NaOH} - 50 \dots 60$	60-90
2	$\text{NaOH} - 20 \dots 35, \text{Na}_2\text{CO}_3 - 20 \dots 30$	40-60
3	$\text{NaOH} - 100, \text{NaCl} - 20, \text{NaF}$	200-250
4	$\text{NaOH} - 50 \dots 100, \text{NaF} - 30 \dots 50$	40
5	$\text{H}_2\text{SO}_4 - 360, \text{CrO}_3 - 60$	60-70

Так как щелочи очень активны, их применяют для удаления оксидной пленки с поверхности металла. При использовании щелочей, после процесса очистки остается шлам. Для удаления шлама используют кислоту(например, 50 %-ная азотная кислота при комнатной температуре до 30

«Низкотемпературная пайка применяется для алюминия и его сплавов достаточно широко. Полученные соединения, как правило, имеют невысокие прочностные характеристики. Температура нагрева при низкотемпературной пайке не превышает 450°С.»[19].

Все способы пайки разделяются на флюсовые и без использования флюса. Низкотемпературная пайки алюминия без использования флюса и его сплавов базируется на процессе механического удаления оксидной пленки с поверхности изделия с последующей сборкой и пайкой. Абразивная, ультразвуком и абразивно-кавитационная пайка являются основными способами низкотемпературной пайки без использования флюса.

«Абразивную пайку производят в основном легкоплавкими припоями с помощью шаберов, металлических сеток и щеток, щеток из стекловолокна, абразивными прутками и кругами, изготовленными прессованием из порошка припоя и мелкодисперсного асбеста.» [19].

«Флюсовая высокотемпературная пайка алюминия и его сплавов готовым припоем может быть выполнена с локальным нагревом в пламени паяльных ламп, горелок, токами высокой частоты и общим нагревом в печах и погружением в флюсовые ванны» [19, 55].

Печная пайка позволяет осуществлять процесс пайки большого количества изделий в один цикл нагрева с обеспечением требуемого качества, благодаря равномерному их нагреву и охлаждению. При процессе пайки алюминия в печах используют воздушную и защитную атмосферу.

«Основным недостатком всех способов флюсовой пайки является высокая коррозионная активность применяемых флюсов, что требует их тщательного удаления с поверхности изделия после пайки. Применение не коррозионных флюсов исключает операцию отмывки изделий от остатков флюса, но предъявляет жесткие требования к качеству и стабильности паяльной атмосферы.

В настоящее время происходит активная замена флюсовой пайки на более экологически чистую бес флюсовую пайку.

Пайка алюминия без применения флюсов возможна при нагреве в без окислительной среде (вакуум, инертные газы), что позволяет сохранить малую толщину слоя оксида, возникшего после предварительного травления, и способность к нарушению его сплошности при нагреве» [60].

заполненный аргоном, подобрать метод контроля на герметичность сварного шва.

1.2. Припой применяемы для процесса пайки алюминия и сплавов.

Припой, применяемые для пайки алюминия и его сплавов, можно разделить на три группы.

1. Легкоплавкие припой на основе олова, свинца, кадмия с температурой плавления ниже 300°C. Эти припой обладают низкой прочностью и образуют соединения с низкой коррозионной стойкостью, требующие специальных защитных покрытий от коррозии. Перед пайкой необходимо предварительное облуживание соединяемых поверхностей. Пайку в основном производит вручную электропаяльником или в ультразвуковых ваннах с расплавленным припоем [19, 20, 49].

2. Припой в которых основной компонент цинк, имеют высокую прочность и стойкость к коррозии, диапазон температуры плавления в 300-450°C (таблица 2). Процесс пайки этими припоями возможно применять для большинства алюминиевых сплавов. Способы пайки для этих припоев могут быть выбраны следующие: абразивом, ультразвуком, горелкой с использованием флюса, печной нагрев. [19, 21, 45].

Недостатки таких припоев:

- невысокая пластичность;
- плохое растекание и затекание в паяльный зазор;
- склонность к эрозии.

Таблица 2. – Хим. Состав припоев для пайки алюминия[21].

Марка припоя	Химический состав, %					Температура, °С		
	Zn	Al	Cd	Cu	Ag	Солидус а	Ликвидус са	Пайки
П300А	59-61	-	39-41	-	-	265	310	260
П425А	Основ а	19-21	-	14-16	-	415	425	460-500
Пер5АКЦ	Основ а	2-3	-	-	4-5	400	420	450
ПАКЦ	Основ а	19-21	-	-	-	420	450	480-500

3. Припой, в которых основной компонент алюминий имеют достаточно высокую прочность паяных соединений и высокую стойкость к коррозии, интервал температуры плавления 460-630°С (таблица 3) [19, 45, 50, 51].

Таблица 3 – Хим. состав припоев на основе алюминия [21].

Марка припоя	Состав припоя, %				Температура, °С		
	Al	Si	Cu	Прочие	Соли-дуса	Ликвидуса	Пайки
–	96-94	4-6	–	–	577	625	625-640
–	93-92	7-8	–	–	577	600	600-615
AK12	89-87	11-12	–	–	577	600	590-610
PrC4M	86	10	4	–	525	585	610
П590А	89	1	10	–	535	590	605-610

Припои ПЗ4А и АК12 получили большее применение в промышленности из-за высокой стойкости к коррозии в сравнении с прочими припоями, а также высокую прочность и пластичность паяных соединений ($\delta_{ср.}=100-112$ МПа). Применяются при пайке в печах и солевых ваннах деталей, теплообменников и деталей агрегатов. ПЗ4А – можно применять с нагревом ТВЧ, горелками, электроконтактным способом. Обладают высокой пластичностью, из-за этого производятся в формате прутка.

Припои, в состав которых входят кремний и медь (PrC4M, П590А, ПЗ4А), а также силумины, применяются только при процессе пайки сплавов с высокой температурой плавления (АМц, АМг, АВ).

Форматы припоев для процесса пайки алюминия: проволока, порошок, паста, фольга, плакирующий слой и т.д. Применение припоев в виде проволоки при ручном и печном нагреве обуславливается простотой закрепления в паяльном зазоре. Применение припоев в виде порошка,

пасты, фольги обуславливается простотой нанесения перед пайкой при печном нагреве и в флюсовых ваннах.

Отечественное производство изготавливает листы и ленты толщиной 0,5-2,5 мм из сплавов типа АПС и АМцПС с одно и двухсторонней плакировкой. [52].

«Находят применение пастообразные припои, состоящие из смеси порошка припоя, флюса и связующего вещества. Для пайки в среде защитного газа или в вакууме применяют соответствующие пасты без флюса, однако, порошки из припоев системы Al-Si и Al-Si-Mg оплавляются частично» [47]. «Достоинство порошковых припоев – возможность их изготовления практически из любого металла, в том числе непластичного. Для пайки алюминиевых сплавов АМц, АД1 и др.» [45]

Припои на основе цинка.

При процессе пайки деталей из сплавов на основе алюминия применяют припои, в которых основной компонент цинк и олово. При процентной доле олова больше 30% припой показывает высокую прочность и пластичность, высокую технологичность при процессе пайки алюминиевых и цинковых сплавов, но стойкость к коррозии этих соединений в атмосфере с влажностью невысокая и требуется защита с помощью лакокрасочных покрытий. Для получения технологических свойств в состав припоя на основе цинка добавляют легирующие элементы.

Таблица 4 - Припой на основе цинка.

Марка	Содержание элементов, % (Zn – остальное)								Температура, °С	
	Al	Cu	Cd	Sn	Ag	Si	Pb	Mn	Начало плавления	Полного Расплавления
В63	8	3...5	-	0.5	-	-	1.5	-	360	420
ПЦАМ-65	19...20	14...15	-	-	-	-	-	-	330	420
ПЗ00А	-	-	39...41	-	-	-	-	-	266	310
П425А	19...21	14...16	-	-	-	-	-	-	415	425
П480А	19...21	14...16	-	-	-	-	-	0.5...0.7	480	490
Мосэнерго	-	-	25	35	-	-	-	-	250	300
«Б»	13.5	10	31.5	-	-	-	-	-	320	340
ПЦАМКд-45	11.5	8.5	40	-	-	-	-	-	290	310
ПЦАМКд-40	2...3	-	-	-	4...5	≤0.15	-	-	400	420
ПсР5АКЦ	19...20	-	-	-	-	≤0.15	-	-	420	450
ПАКЦ	8	5	-	0.6	-	-	1.4	-	360	410
ПЦАМ8М	-	-	40	-	-	-	-	-	266	335
-	-	-	20	15	-	-	-	-	163	346
-	-	-	-	40	-	-	-	-	199	370
-	-	1.5	-	40	-	-	-	-	200	370
Мосэнерго	7	4	-	0.5	-	-	0.5	-	370	380
«А»	5	-	-	-	-	-	-	-	-	380
-	19...21	4...5	-	-	-	-	-	-	377	395
-	11	7	-	-	-	-	-	-	385	389
-	4...6	0.2...0.3	2	-	-	-	-	0.9...1.5	315	365
48		Co	2.5					Mg		
ВПр23										

Припой на основе цинка и меди выглядят как двойные системы сплавов меди и цинка в разных композициях. Чтобы уменьшить температуру плавления и повысить технологические свойства медноцинковых припоев в состав вводят в малых количествах олово и кремний (до 1%). При добавлении олова понижается температура плавления припоя и увеличивается его жидкотекучесть; кремний способствует понижению испарения цинка; добавление в припой малого количества бора придает флюсующие свойства.



Рисунок 1 Припой П300А

В ГОСТ 23137-78 определяется три марки медноцинковых припоев с большим содержанием цинка и сниженной температурой

Таблица 5- Припой на основе меди и цинка.

Марка	Химический состав, %				Назначение
	Основные компоненты		Примеси, не более		
	Cu	Zn	Fe	Pb	
ПМЦ 36	34...38	Ост.	0.1	0.5	Для пайки латуни, содержащей до 68% Cu
ПМЦ 48	46...50	Ост.	0.1	0.5	Для пайки медных сплавов, содержащих Cu свыше 68%
ПМЦ 54	52...56	Ост.	0.1	0.5	Для пайки меди, бронзы и стали

Таблица 6- Припой на основе меди и цинка с твердостью.

Марка	Температура плавления, °C		Плотность кг/м ³	Коэффициент линейного расширения α , 10 ⁻⁶ K ⁻¹	Удельное сопротивление противление мкОм·м	Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Твердость НВ
ПМЦ 36	800	825	7700	22	10.3	Хрупкий	-	-
ПМЦ 48	850	865	8200	21	4.5	205.8	3	130
ПМЦ 54	876	880	8300	21	4	343	20	128

Физико-химические свойства цинка.

«Цинк металл серебристого цвета обладающий средней твердостью , при контакте с воздухом тускнеет, покрывается тонкой оксидной пленкой, которая защищает металл от дальнейшего окисления. Чистый цинк обладает высокой пластичностью, и благодаря этому возможна прокатка в фольгу или лист. Технический цинк при обычной температуре достаточно ломок, при 100- 150°C может прокатываться в листы и вытягиваться в проволоку, так как становится тягучим. Выше 200°C цинк становится хрупким, что

позволяет изготовить из него порошок, при температуре выше 200°C цинк переходит в другую аллотропную форму. Цинк кристаллизуется в гексагональной решетке.»[47] Физические свойства цинка:

Температура плавления цинка, °С	419,44
Температура кипения цинка, °С	906
Теплота плавления цинка	24,09 кал/г
Теплота испарения цинка	28 (650°C), 60(700°C), 240(800°C), 717(900°C)
Теплота сгорания цинка	83 ккал/г-атом
Твердость по Бринеллю, кг/мм ²	40-50
Модуль упругости, аГ/мм ²	8000-10000

Цинк, под воздействием воздуха при комнатной температуре не разрушается, но с 225°C скорость окисления быстро растет. При большой влажности в атмосфере цинк разрушается с образованием гидрокарбоната цинка с различным соотношением ZnO, CO₂. H₂O. При высоком нагревании на воздухе сгорает ярким зеленосиним пламенем с образованием оксида цинка. В состоянии расплава цинк неограниченно смешивается со множеством металлов: Cu, Ag, Au, Cd, Mn, Fe, Co, Ni, Al, Sn. Со многими металлами цинк способен образовывать соединения, например с Cu, Ag, Au, Cd, Mn, Fe, Co, Ni, Pt, Sb, Mg, Ca, Li, Na, K.

Пайка алюминия цинковым припоем.

В настоящее время, достаточно большое количество изделий промышленности, изготавливаются пайкой, так как это качественное неразъемное соединение обеспечивает требуемые прочностные характеристики.

При пайке алюминия возникают проблемы связанные с тем, что поверхность этого металла покрыта тонкой, эластичной и прочной пленкой окисла – Al_2O_3 . Удалить ее механическими методами не удастся, т.к. при соприкосновении чистой поверхности алюминия с воздухом или водой, он покрывается оксидной пленкой. Только в нейтральной среде реакция окисления проходить не будет. Обычные флюсы не растворяют окислы.

Вакуум считается идеальной нейтральной средой, обеспечить который можно с помощью специальной вакуумной печи. Вакуумные печи на данный момент очень дорогостоящие, но существует способ пайки контактно-реактивного плавления, при котором можно обойтись и без специального оборудования.

Припой системы Al-Zn достаточно широко используется для пайки сплавов на основе алюминия[1]. Существует целый ряд припоев в этой системы, предназначенной для низкотемпературной пайки или высокотемпературной пайки, но в рассматриваемой системе возможно также образование припоя в процесс контактного плавления. [2]

Проведены опыты пайки алюминиевых образцов с толщиной цинковой пластины 0.15;0.17;0.19;0.29;0.43 мм. Перед пайкой проводилась подготовка поверхности образцов травление в ванне из водного раствора 60-160 г/л NaOH и осветление в 30% водном растворе HNO_3 , потом припой помещался в паяльный зазор и обваривался по контуру аргоно-дуговой сваркой. Далее проводилась пайка в печи при температуре $520^{\circ}C$ с выдержкой 10 мин.

Результаты: с увеличением толщины пластины цинка растекания припоя уменьшается. Испытание образца на разрыв показало, что соединение хрупкое, припой наблюдается на обеих частях соединения

В дальнейшем необходимо подобрать толщину цинковой пластины и необходимые режимы пайки, использовать вакуумный контейнер заполненный аргоном, подобрать метод контроля на герметичность сварного шва.

1.3. Контактно-реактивная пайка

Контактно-реактивная пайка особенно перспективна при соединении металлов (сплавов) через тонкую прослойку другого металла или сплава, нанесенного предварительно гальваническим методом, плакированием или термовакуумным напылением, с последующим контактнo-реактивным плавлением между ними. [1]

Контактно-реактивная пайка А1 и его сплавов с использованием в качестве покрытия Ag и Си нашла применение как бесфлюсовый способ пайки, который позволяет получать прочные и коррозионностойкие соединения. Контактнo-реактивную пайку широко используют для соединения сплавов Си между собой и со сталями. Применение покрытия из Ag позволяет получать соединения при 800 С, имеющие относительно высокую прочность и пластичность за счет образования Ag-Cu - эвтектики. Нанесение тонкого Ag-покрытия (1 2 - 6 мкм) на латунные детали обеспечивает процесс пайки при 700 С. Паяный шов должен быть достаточно тонким, так как образующаяся Ag-Си - Zn-эвтектика малопластична из-за наличия в ней хрупкой P (Ag-Си) - фазы. [3]

Контактно-реактивная пайка меди и ее сплавов стойкой прослойкой серебра, алюминия (или его сплавов) с тонкой прослойкой серебра или меди, нанесенных гальванически или методом плакирования, напыления и др., может быть осуществлена в невысоком вакууме или проточном чистом аргоне без применения флюсов. [4]

Контактно-реактивная пайка графита с медью через титановую и циркониевую металлическую прослойки основана на том, что при нагреве в результате взаимной диффузии меди и титана образуется эвтектический сплав, который активно смачивает и растекается по поверхности соединяемых материалов. [5]

Контактно-реактивная пайка сплавов из алюминия, которые обладают значительным показателем химической активности, успешно обеспечивает при термовакуумном напылении, возможно плакирование поверхности. Надежный способ нанесения равномерно тонких (10 мкм) покрытий на сплавы магния является напыление ионами в тлеющем разряде. [6]

Контактно-реактивную пайку рекомендуется осуществлять при обеспечении непрерывного поджата соприкасающихся элементов, дабы не допустить прекращения процесса контактно-реактивного плавления. [7]

Контактно-реактивная пайка проводится, при условии обеспечения максимального смачивания графита жидким расплавом, для упрощения технологии проводится на воздухе. [8]

При контактно-реактивной пайке соединений с телескопической конструкцией из сплавов различных материалов наружная соединяемая часть наружная должна изготавливаться с большим значением коэффициента сокращения; сборка производится с тугй посадкой, используется подогрев наружной соединяемой части и с внутренним охлаждением. [16]

Контактное плавление

Контактное плавление в двойной системе α - β при определенной постоянной температуре осуществляется за счет одновременного притока в жидкостные компоненты α и β . При втекании одного из компонентов системы, в качестве примера α , в результате полного расплавления прекращается, то рост фазы жидкой прекращается и замедляется плавление компонента β .

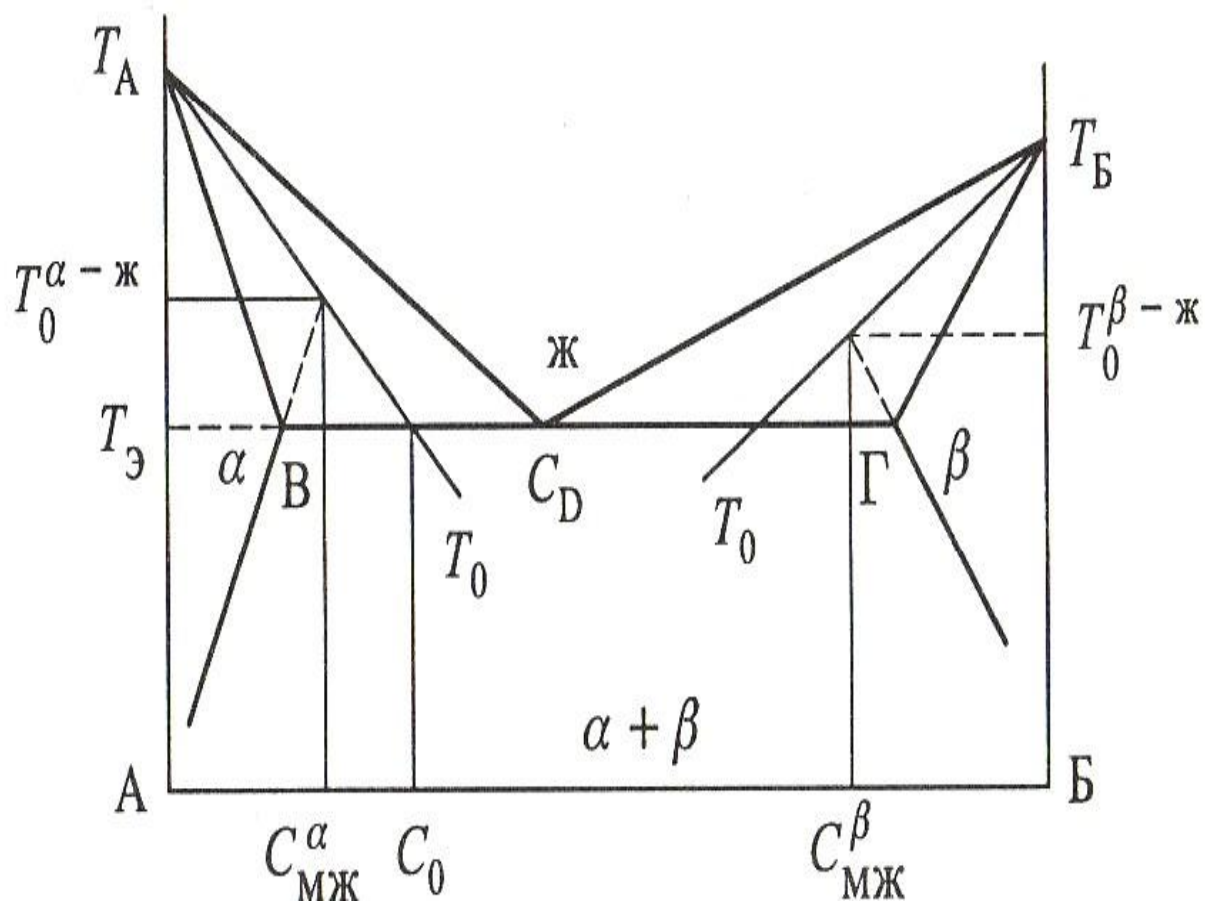


Рисунок 2. Схема контактного плавления

Для резки металлов, в качестве примера – алюминия и его сплавов используется процесс охрупчивания одного компонента на другое.

Режимы контактного плавления. Контактное плавление, изучается в режимах , где размеры образцов, температура проведения исследования и процесс развития контактного плавления происходит по определенным требованиям. Это позволило получить контактные прослойки определённых форм и размеров, но и изучить механизм кинетики роста жидкой зоны, исследовать диффузионные процессы в расплаве, поверхностные явления на границах твердого тела – жидкости, определить концентрацию ликвидуса и физические химические величины. Проведение контактного плавления в выбранных режимах дает возможность определить величину промежуточных фаз в сложной системе (при высоком и нормальном давлении). Помимо этого, условия проведения эксперимента

строго по плану позволит установить степень влияния внешних факторов на процесс контактного плавления.

Во множестве работ по изучению процесса контактного плавления происходит в один из режимов: стационарный, нестационарно-диффузионный, конвективный, диффузионно-кинетический и импульсный. При проведении опыта должны соблюдаться минимальное отклонение габаритных размеров образцов и минимальные скачки температуры. Пример Результата контактно-реактивного плавления показан на рисунке 3

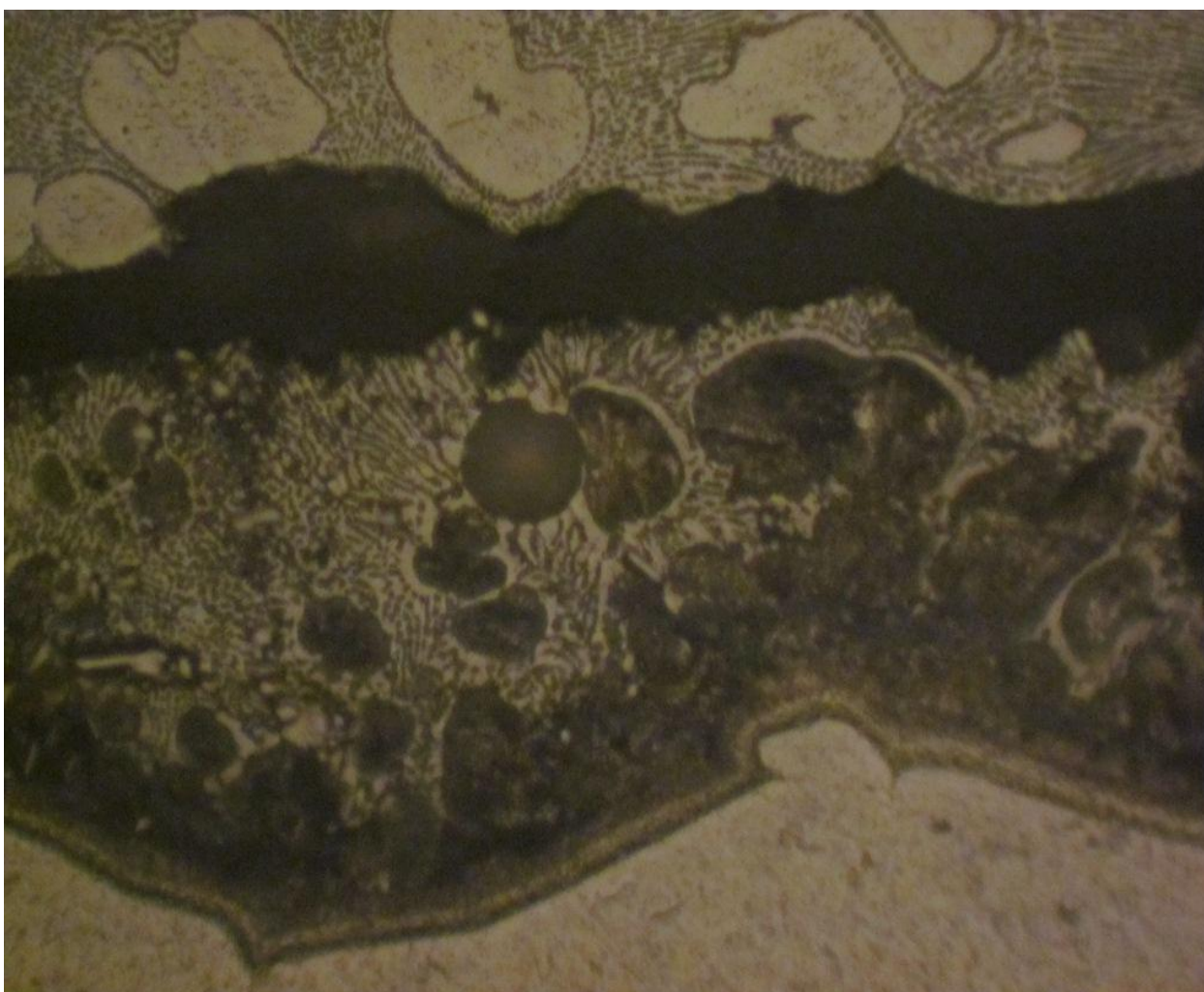


Рисунок 3 - Контактное-реактивное плавление при паке алюминия цинком

Автовакуумная пайка

«Положительный многолетний опыт применения автовакуумной сварки давлением при производстве листового биметалла позволяет утверждать, что она хорошо зарекомендовала себя в этом виде производства. Вместе с тем, автовакуумная сварка давлением непригодна для изделий тяжелого машиностроения. Причина этого кроется в необходимости осуществлять сравнительно большую сварочную деформацию, что не подходит для условий производства, когда нужно сваривать детали близкие по своей форме и размерам к элементам готовой конструкции.

В отличие от автовакуумной сварки давлением, автовакуумная пайка осуществляется, как правило, без давления, либо, когда это необходимо, с давлением, вызывающем крайнее небольшую деформацию.

Наряду с этим, автовакуумная пайка может обеспечить большую по сравнению со сваркой стабильность прочностных свойств. Так в биметаллическом листе 12X18Н10Т + 12Х3М полученном автовакуумной сваркой давлением, прочность соединения не ниже, чем 30кг/мм^2 (при испытании на срез). Однако при нарушении технологического процесса может быть получено значение прочности близкое к нулю. Такое падение прочности происходит в том случае, когда по какой-либо причине не был обеспечен в данной точке надежный контакт и совместна пластическая деформация соединяемых деталей.

При автовакуумной пайке на стабильность прочности соединения влияют меньше факторов, потому что паяльный зазор заполняется расплавом припоя. При этом прочность соединения оказывается ниже, чем при автовакуумной сварке, однако, значение ее оказывается более стабильным. Благодаря этой особенности автовакуумная пайка считается более перспективной для тяжелого машиностроения, чем автовакуумная сварка.

Таким образом, если герметизировать зазор, образованными поверхностями 2-х стальных деталей, подлежащее соединение, а затем эти детали нагреть, произойдет растворение окислов и атмосферных газов, находящихся в зазоре.»[11]

Первые опыты по пайке с некапиллярным герметичным зазором проводились в специализированной лаборатории Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины в начале 70-х годов. Этот способ пайки был назван «автовакуумной пайкой» (АВП). В процессе этих работ были установлены основные параметры технологического процесса пайки, допустимые границы изменения этих параметров. Были разработаны и испытаны в лабораторных условиях несколько составов припоев. После этого было принято решение об изготовлении промышленных узлов с помощью АВП. В качестве базового производственного предприятия был выбран завод «Ждановтяжмаш». Объектом внедрения АВП были выбраны патрубки нефтеперерабатывающих реакторов.

«На протяжении десятков лет при изготовлении рабочих колес ЦКМ применяется -высокотемпературная пайка в вакууме. Для изготовления паяных колес выбрана прочная и пластичная сталь 07X16H6 с пределом текучести 1000 МПа. Выбор этой стали обусловлен не столько ее высокими механическими свойствами, сколько в основном ее структурной особенностью. Сталь при нормальной температуре может иметь аустенитную структуру и при высокотемпературном нагреве в процессе пайки не претерпевает структурных изменений со значительным изменением объема металла. Это обеспечивает минимально возможную деформацию деталей колеса при нагреве и позволяет сохранить размеры паяльных зазоров, необходимых для капиллярной пайки. Как правило, для обеспечения прочности соединения эти зазоры должны быть в пределах 0,05-0,25 мм.

Спаянное колесо из стали 07X16H6, обладающее определенной прочностью, подвергают термической обработке: закалке при 1050 °С, обработке холодом и старению. Такая термообработка обуславливает переход аустенитной структуры в мартенситную и обеспечивает необходимый комплекс свойств как основного металла, так и паяного соединения. Необходимость высокотемпературной термической обработки паяного колеса требует применения высокотемпературного жаропрочного припоя на основе палладия. Он обеспечивает высокую прочность соединения не только при работе колеса, но и при его закалке. Припои известных систем не обладают таким комплексом свойств. Таким образом успешное применение высокотемпературной пайки при изготовлении рабочих колес ЦКМ обусловлено применением единой композиции сталь-припой с уникальными свойствами. Кроме строгой ограниченности в выборе материалов, технология обладает существенным недостатком, связанным с дефицитностью и высокой стоимостью палладиевого припоя. При этом являются проблемными вопросы конструкционной прочности рабочего колеса. Высокотемпературный нагрев (1250 °С) в вакуумной печи при пайке колеса палладиевым припоем и последующее медленное охлаждение в вакууме обуславливают значительный рост зерна в стали и снижение ее усталостной прочности. Восстановить механические свойства стали после такого термического цикла последующей термической обработки не всегда представляется возможным. Кроме того, тавровое соединение, паянное палладиевым припоем, характеризуется значительным концентратором напряжения, так как расплавленный припой под действием капиллярных сил формирует галтель радиусом не более 1 мм. Такая галтель вдвое снижает усталостную прочность основного металла, и при работе колеса в галтельном участке зарождается трещина.

Предпринимаются попытки повысить конструкционную прочность колеса. Так, фирма Дрессер Ранд Турбо применяла для увеличения

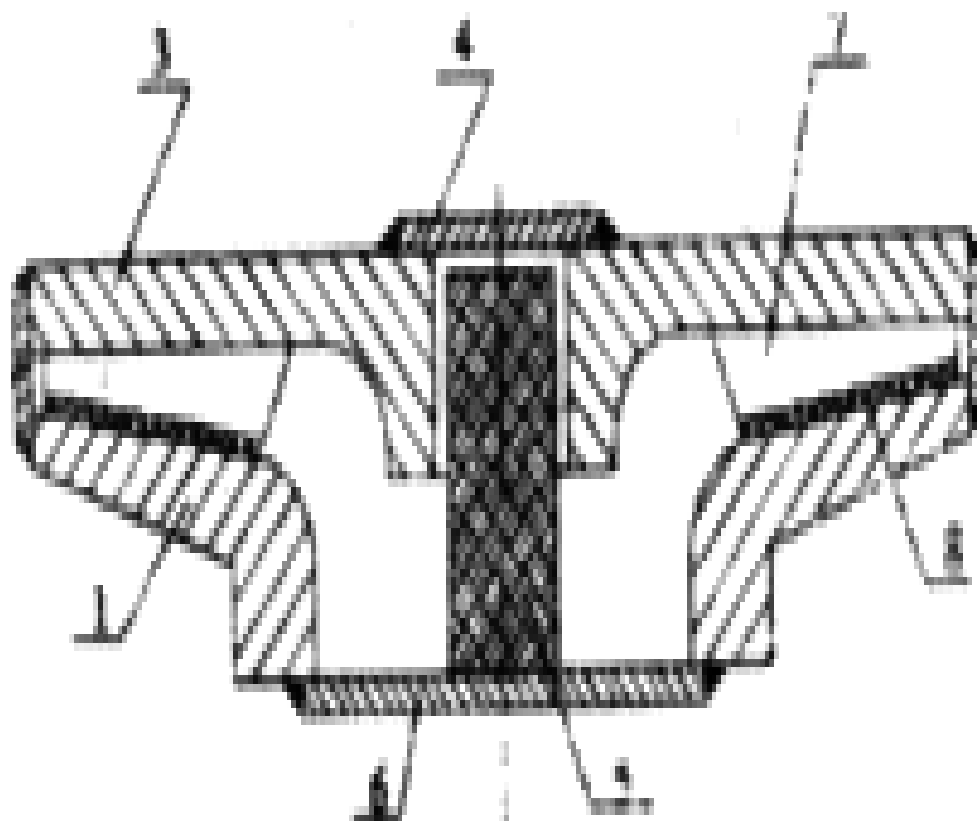
значения прочности колеса электроннолучевую сварку с одновременной пайкой галтельных участков, использовался припой на основе золота. При этом электронный луч проплавляет покрывающий диск, расплавляет помещенный в зазоре припой и проплавляет частично лопатку. Однако при повышении статической прочности соединения усталостная прочность не повышается, так как радиус галтели, образованный припоем, не превышает 1 мм.

Колеса, паянные медно-никелевым припоем с применением формирования галтели радиусом 5мм, прошли длительные натурные испытания на компрессорах газоперекачивающих агрегатов без разрушений.

Такая технология имеет существенный недостаток: швы, паянные припоями на медной основе, разрушаются при высокотемпературной закалке колеса. С увеличением диаметра колеса опасность разрушения повышается.

Устранить этот недостаток можно применением закрепления лопаток сваркой с проплавлением покрывающего диска перед пайкой с формированием больших галтелей из порошка. Для этого можно применить электроннолучевую или аргонодуговую сварку неплавящимся электродом. Электроннолучевая сварка имеет определенные преимущества: отсутствие окисления металла в зоне термического влияния шва, глубокий узкий провар без разделки кромок, минимальные деформации. Однако необходимость применения дорогостоящей электроннолучевой установки является существенным недостатком.

Более перспективной представляется комбинированная технология изготовления рабочего колеса, включающая аргонодуговую приварку лопаток через пазы в покрывающем диске, формирование галтелей необходимого размера из порошка и высокотемпературную пайку с применением автовакуумного нагрева. Схема процесса представлена на Рисунке 4.



1 – диск; 2 – бандаж; 3 – диск с лопатками; 4 – технологическая заглушка;
 5 – патрон с сорбентом и активатором; 6 – технологическая заглушка;
 7 - лопатка; 8 – паяный шов

Рисунок 4 – Схема автовакуумной пайки рабочего колеса компрессора

Сварка осуществляется через пазы определенной формы и протяженности, необходимой для прочного соединения диска и лопаток. После сварки формируются галтели, и рядом с ними размещается дозированное количество припоя. В полости колеса устанавливается патрон с активированным сорбентом. Полость колеса герметизируется приваркой бандажа и технологических заглушек. Колесо нагревается по определенному циклу в обычной электрической печи до температуры пайки, выдерживается и охлаждается на воздухе или в воде. При необходимости после пайки герметизированное колесо подвергают термообработке: нормализации, закалке, отпуску.» [8]

«Возможность осуществления такой технологии обусловлена соответствующим выбором технологических материалов. Порошки для формирования галтелей должны обеспечить сохранение размера и формы галтели, способствовать очистке от оксидной пленки металла в зоне термического влияния сварных швов, гарантировать затекание и бездефектную кристаллизацию припоя в зазорах на непроваренных участках таврового соединения. Припой, не содержащий драгоценных и редкоземельных металлов, с температурой плавления 1000 -1050°С должен при взаимодействии с порошком в галтелях сформировать прочный и пластичный композиционный металл шва, обеспечивающий тавровому соединению прочность с основным металлом. Сорбент должен при нагреве поглотить в полости колеса воздух, создать вакуум, а в необходимый момент образовать пары для очистки и активации паяемой поверхности и припоя.

Разработанная во ВНИИкомпрессормаш технология освоена на опытных партиях рабочих колес из стали 07X16H6 и испытана в промышленных условиях. Анализ показывает, что технология обладает определенными преимуществами:

- позволяет изготавливать колеса любых размеров из низколегированных и высоколегированных сталей;
- позволяет формировать в тавровом соединении галтели требуемого размера и формы для обеспечения равнопрочности с основным металлом при вибрационной нагрузке;
- применяемая температура пайки 1000-1050 °С и регулируемая скорость охлаждения позволяет сохранить механические свойства металла колеса;
- для формирования таврового соединения применяются недорогие технологические материалы;

- для осуществления технологии необходимо простое сварочное и термическое оборудование.

Технология с указанными характеристиками может быть осуществлена при незначительных капитальных затратах в серийном и единичном производстве при изготовлении, ремонте и модернизации центробежных компрессорных машин.»[8]

1.4. Задачи магистерской диссертации

Алюминий и алюминиевые сплавы находят массовое применение в машиностроении, авиации и других отраслях. Так как данный металл имеет сложную оксидную пленку, проводить процесс пайки без использования флюса достаточно сложно, а с применением флюсов увеличивается технологический процесс и появляется риск нахождения остатков флюса в паяных соединениях сложных алюминиевых конструкций. Так же оставшийся флюс снижает коррозионную стойкость. В современной промышленности главными критериями в выборе способа пайки являются:

1. Простота используемого оборудования.
2. Простота применяемой технологии.
3. Минимизация затрат на вспомогательные материалы.
4. Минимизация затрат на высоко квалифицированный персонал.
5. Получение качественного паяного соединения.

Из выше перечисленного следует, что способы пайки с использованием флюса могут снизить качество паяного шва в процессе эксплуатации узла, за счет возможной коррозии зоны с неубранным флюсом. Использование способа бесфлюсовой пайки в вакууме требует затрат на вакуумное оборудование и высококвалифицированный персонал. Использование же процесса контактно-реактивного плавления при автовакуумной пайке позволит минимизировать затраты, так как процесс пайки проводится в печах, не используется флюс и не требуется высококвалифицированный персонал. Из сказанного выше следует, что для исследования процесса бесфлюсовой пайки необходимо решить задачи магистерской диссертации:

- Изучить процесс бесфлюсовой пайки.
- Изучить сплавы системы Al-Zn.
- Выявить влияние термического цикла на структуру и химический состав сплавов Al-Zn.

- Составить атлас структур сплавов системы Al-Zn.
- Оценить возможность применения способа бесфлюсовой пайки.

2.Методика исследований

2.1. Исследование сплавов системы Al-Zn.

Результаты проведенных исследований контактно – реактивного плавления не дают полную информацию о сплаве, шов паяного образца имеет включения, но сказать что именно алюминий или цинк и что его сплав, мы не можем.

Таблица 7 – Процентное содержание сплавов Al-Zn.

№	Zn, m	%	Al, m	%
1.	1,092	5	21,005	95
2.	2,135	10	19,733	90
3.	3,161	15	18,511	85
4.	4,35	20	17,362	80
5.	5,487	25	16,196	75
6.	6,541	30	15,662	70
7.	7,624	35	14,754	65
8.	8,64	40	13,187	60
9.	9,885	45	12,308	55
10.	10,983	50	10,545	50
11.	12,086	55	9,314	45
12.	13,141	60	8,496	40
13.	14,124	65	7,554	35
14.	15,317	70	6,804	30
15.	16,488	75	5,622	25
16.	17,692	80	4,476	20
17.	18,436	85	3,836	15
18.	19,644	90	2,35	10
19.	20,894	95	1,062	5

Поэтому было принято решение первоначально изучить структуру сплавов Al-Zn, с разным процентным содержанием его компонентов.

Для исследования используем алюминий технической чистоты А7, его химический состав указан в таблице 8. Твердость материала А7: НВ 10 -1 = 20 МПа. Особенности проката (волочение проволоки) алюминия А7 (и сходных сплавов): вначале подготавливаются заготовки для волочения методом прокатки, прессованием или литьем, далее выполняется волочение заготовки специальными волоками и периодически отжигают.

Таблица 8 – Химический состав сплава А7, в %.

Fe	до 0,16
Si	до 0,16
Ti	до 0,02
Al	99,7
Cu	до 0,01
Zn	до 0,04

После взвешивания и распределения, сплавы помещаются в нагретую печь и выдерживают до того момента, пока не начнется плавление. В таблице 9 представлены результаты.

Таблица 9 - Потеря массы при нагреве и выдержке в печи.

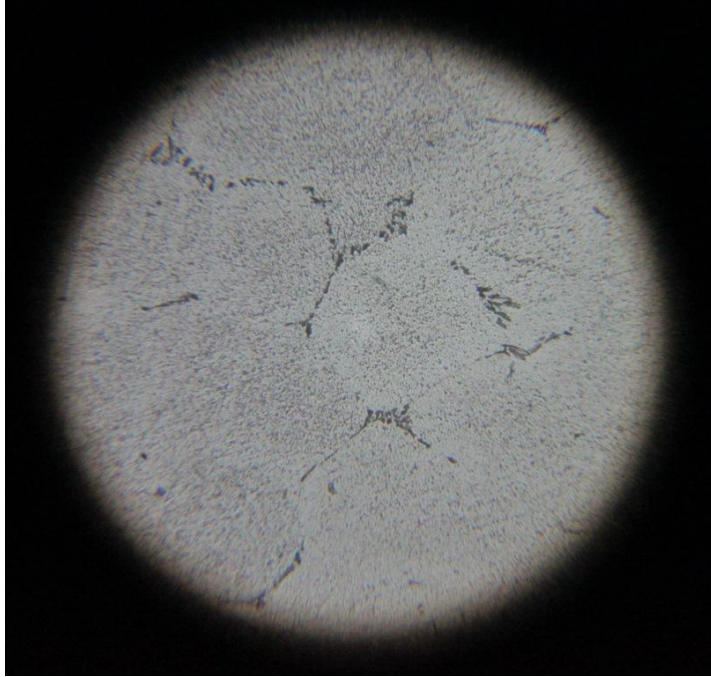
№	Zn m	%	AL m	%	m после нагрева		Потери массы	Сумма масс	Среднее значение
1.	1,092	5	21,00 5	95		22,097			
2.	2,135	10	19,73 3	90	21,192	21,868	0,676		
3.	3,161	15	18,51 1	85		21,672			
4.	4,35	20	17,36 2	80	21,475	21,712	0,237		
5.	5,487	25	16,19 6	75		21,683			
6.	6,541	30	15,66 2	70	22,15	22,203	0,053		
7.	7,624	35	14,75 4	65		22,378			
8.	8,64	40	13,18 7	60		21,827			
9.	9,885	45	12,30 8	55	21,773	22,193	0,42	416,49 7	23,1387
10.	10,98 3	50	10,54 5	50	21,085	21,528	0,443		
11.	12,08 6	55	9,314	45	20,932	21,4	0,468		
12.	13,14 1	60	8,496	40	21,21	21,637	0,427		

13.	14,12 4	65	7,554	35		21,678			
14.	15,31 7	70	6,804	30	21,975	22,121	0,146		
15.	16,48 8	75	5,622	25		22,11			
16.	17,69 2	80	4,476	20	22	22,168	0,168		
17.	18,43 6	85	3,836	15		22,272			
18.	19,64 4	90	2,35	10	21,088	21,994	0,906		
19.	20,89 4	95	1,062	5		21,956			
№	Zn m	%	Al m	%	m после нагрева		потери массы	Сумма масс	Среднее значение

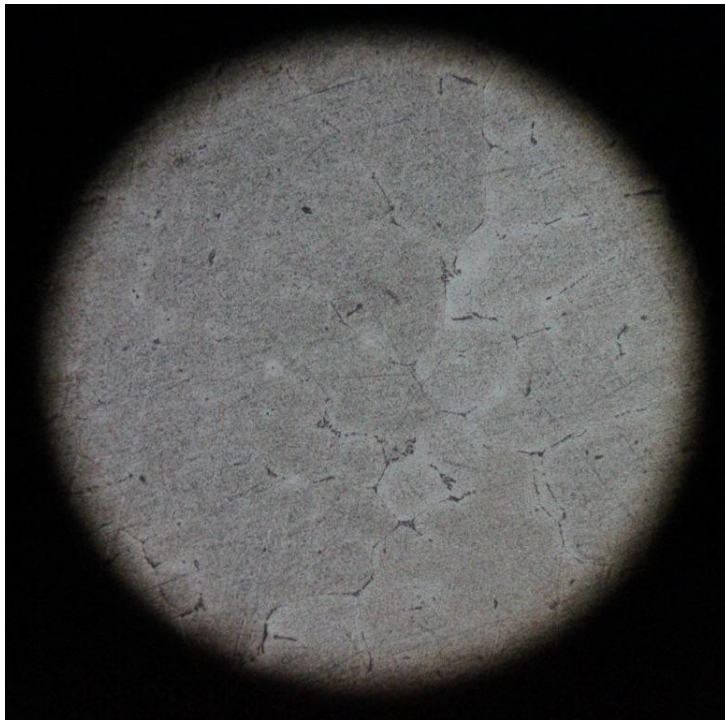
В системе видно два невариантных равновесия: эвтектическое — $J \leftrightarrow (Al) + \beta$ при значении t 382 °С и монотектоидное $\alpha_1 \leftrightarrow \alpha + \beta$ при значении t 275 °С, где α и α_1 — твердый раствор Al, β — твердый раствор (Zn). Критическая точка, находящаяся на бимодальной кривой, ограничивающей двухфазную область $\alpha + \alpha_1$ имеет координаты 351,5 °С и 39,5 % (ат.) Zn. Диаграмма состояния Al—Zn рассчитана с использованием термодинамических данных.

Разница рассчитанных и экспериментальных значений показаний температур солидуса и ликвидуса не превышает значение $\pm 1,5$ °С, а температура монотектоидного превращения и начала процесса расслаивания твердого раствора на две фазы ± 3 °С. Максимальная растворимость Al в (Zn)

при температуре эвтектики 382 °С составляет 2,5 % (ат.), а растворимость Zn в (Al) — 33,5 % (ат.). При процессе старения закаленных сплавов с содержанием 6—30 % (ат.) Zn, было обнаружено, что происходит расслоение твердого раствора Al.



а) увеличение F8 – 37x400

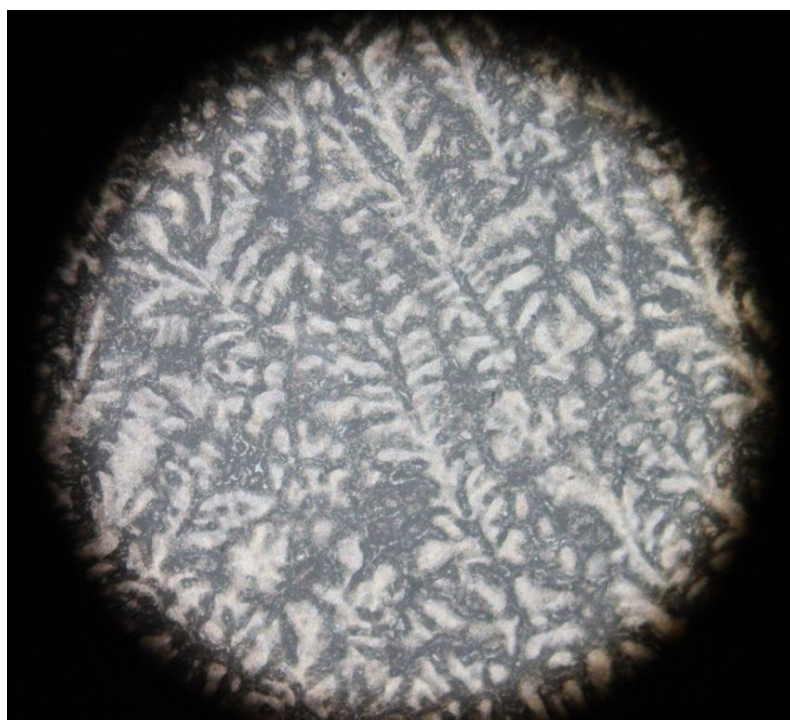


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 5 - Сплав Zn (2,94%)- Al (95%)



а) увеличение F8 – 37x400

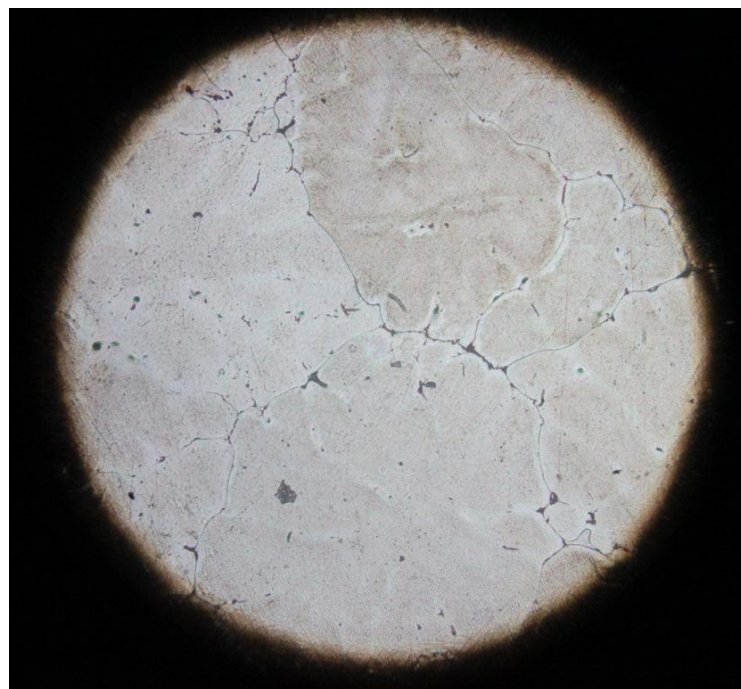


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 6- Сплав Zn (6,71%)- Al (90%)

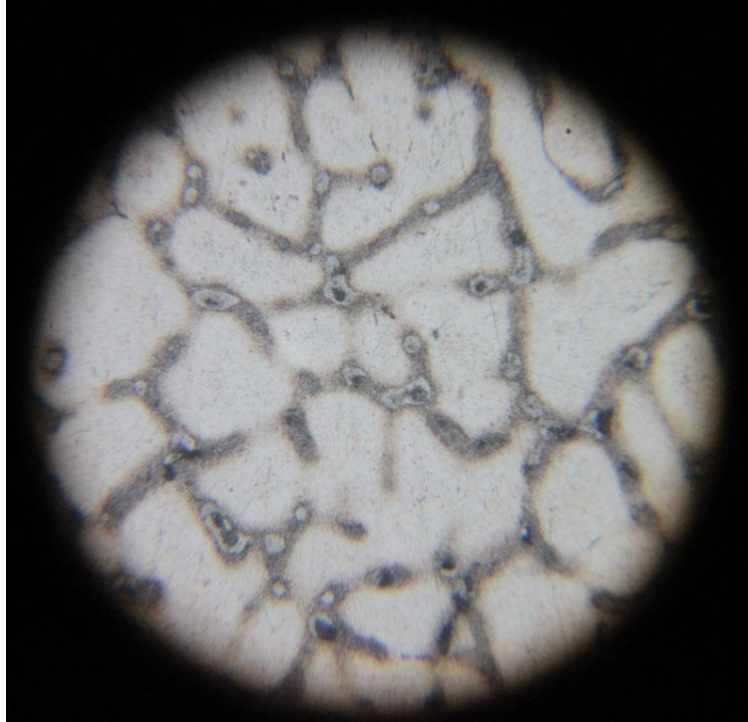


а) увеличение F8 – 37x400

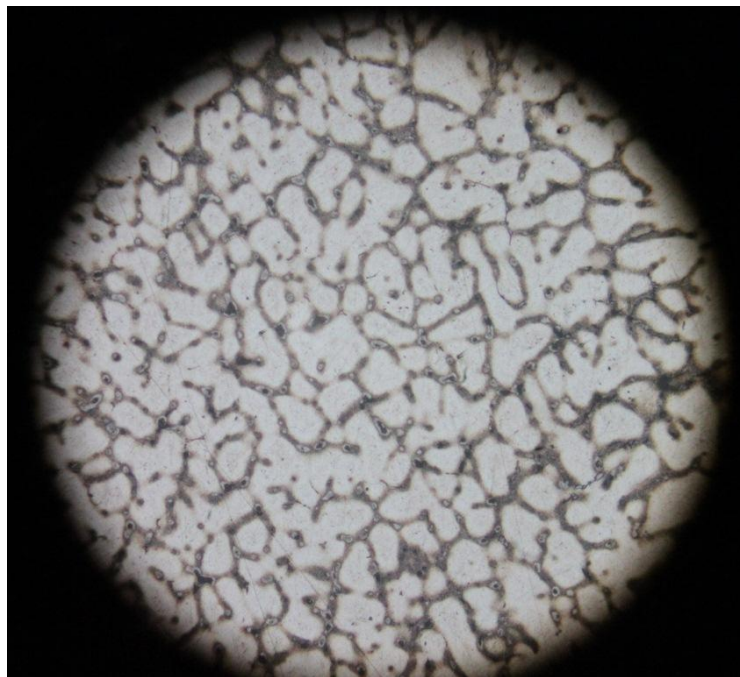


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 7- Сплав Zn (13,17%)- Al (85%)

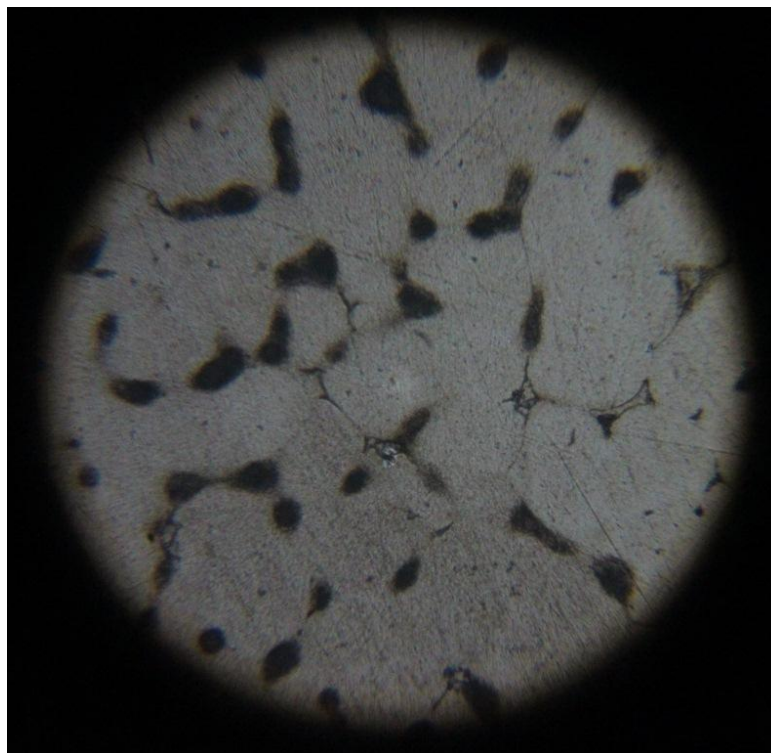


а) увеличение F8 – 37x400

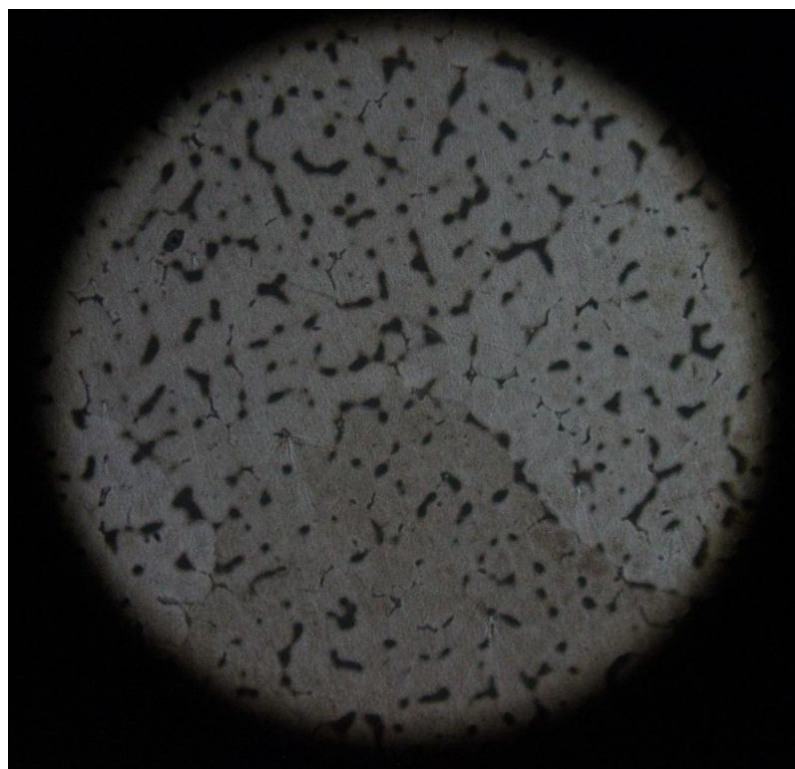


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 8- Сплав Zn (19,15%)- Al (80%)

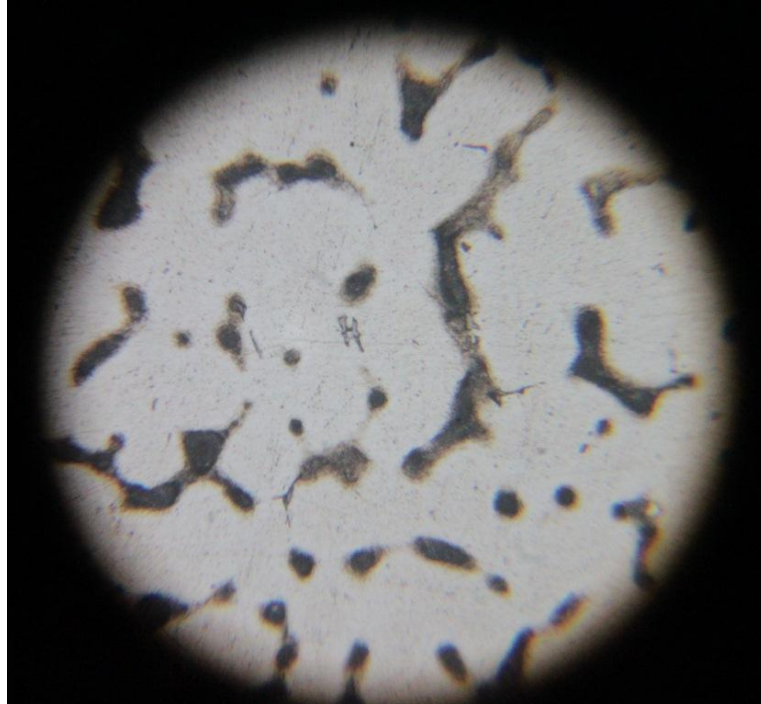


а) увеличение F8 – 37x400

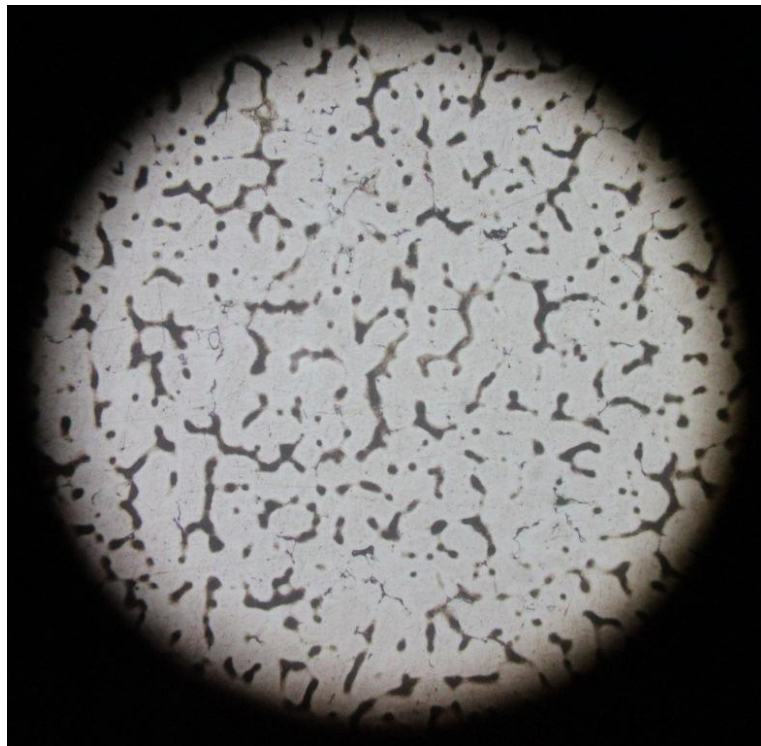


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 9- Сплав Zn (24,98%)- Al (75%)



а) увеличение F8 – 37x400

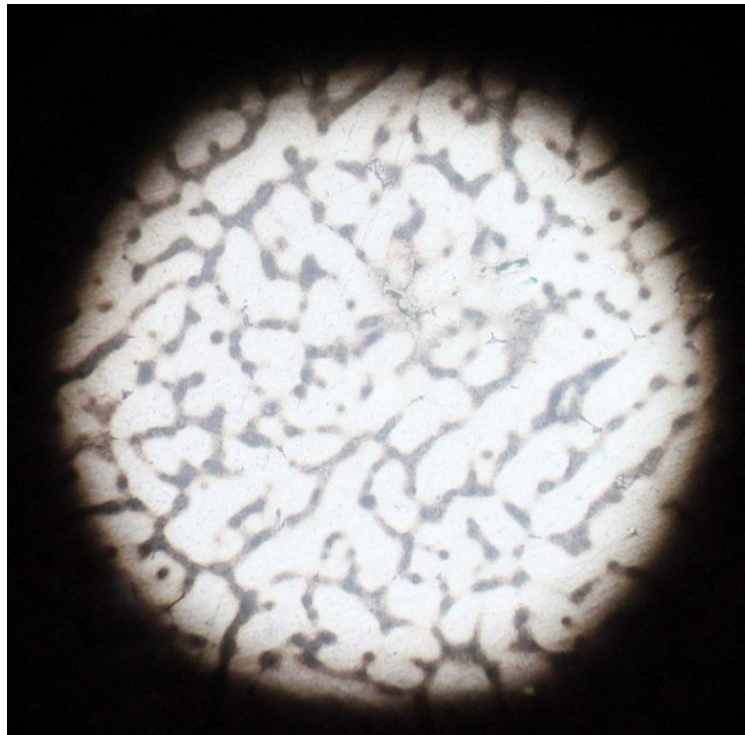


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 10- Сплав Zn (29,29%)- Al (70%)

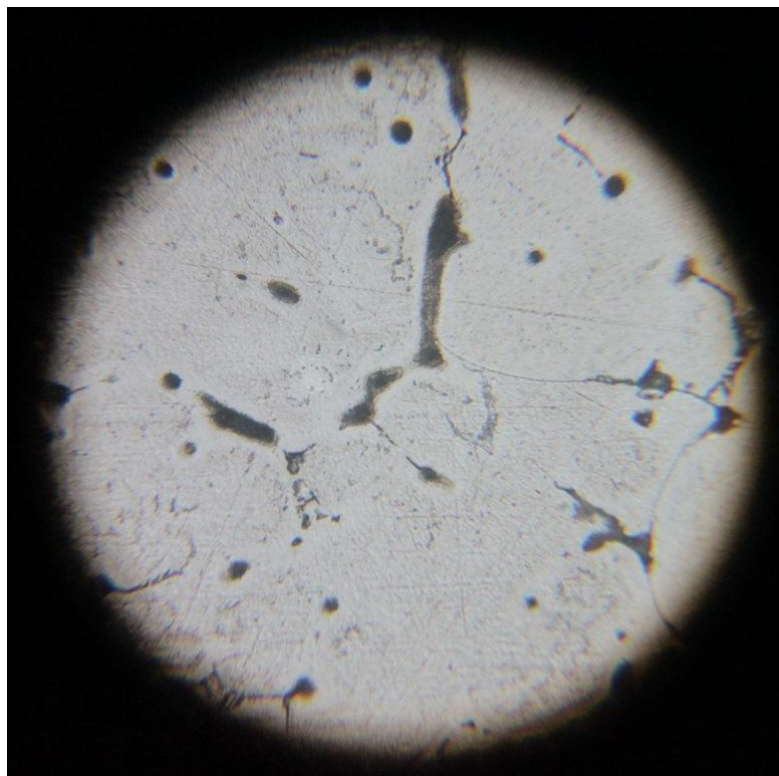


а) увеличение F8 – 37x400

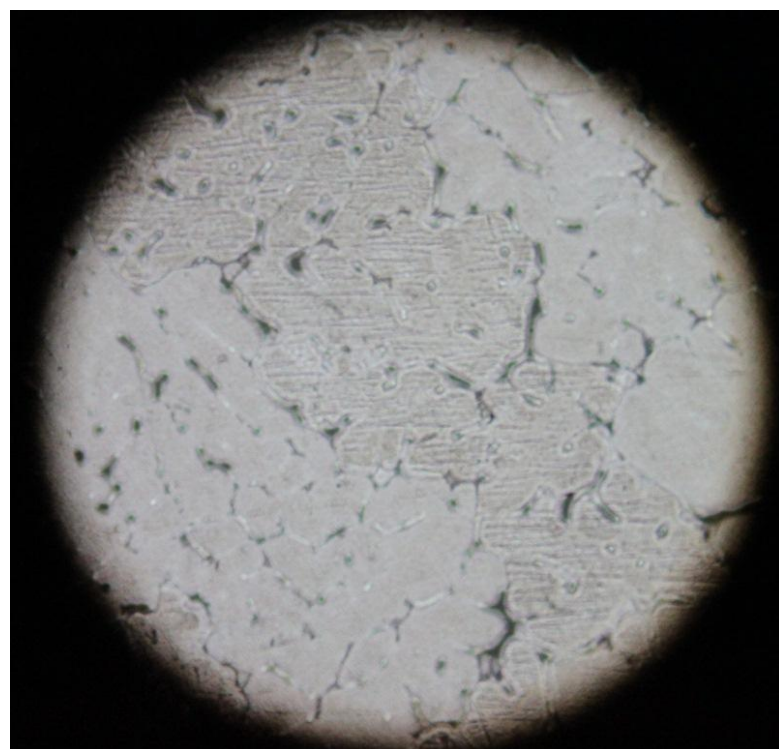


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 11- Сплав Zn (33,36%)- Al (65%)



а) увеличение F8 – 37x400

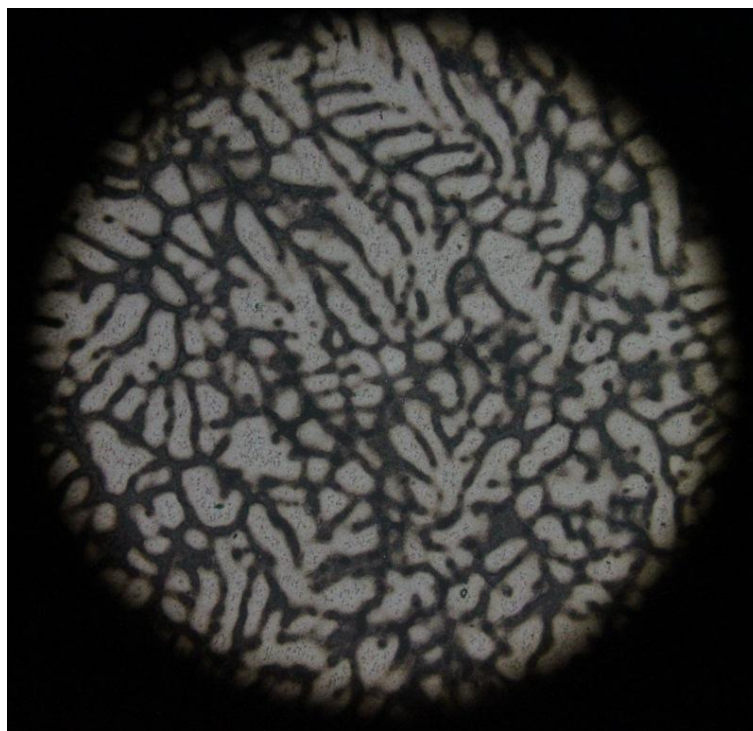


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 12- Сплав Zn (36,54 %)- Al (60%)

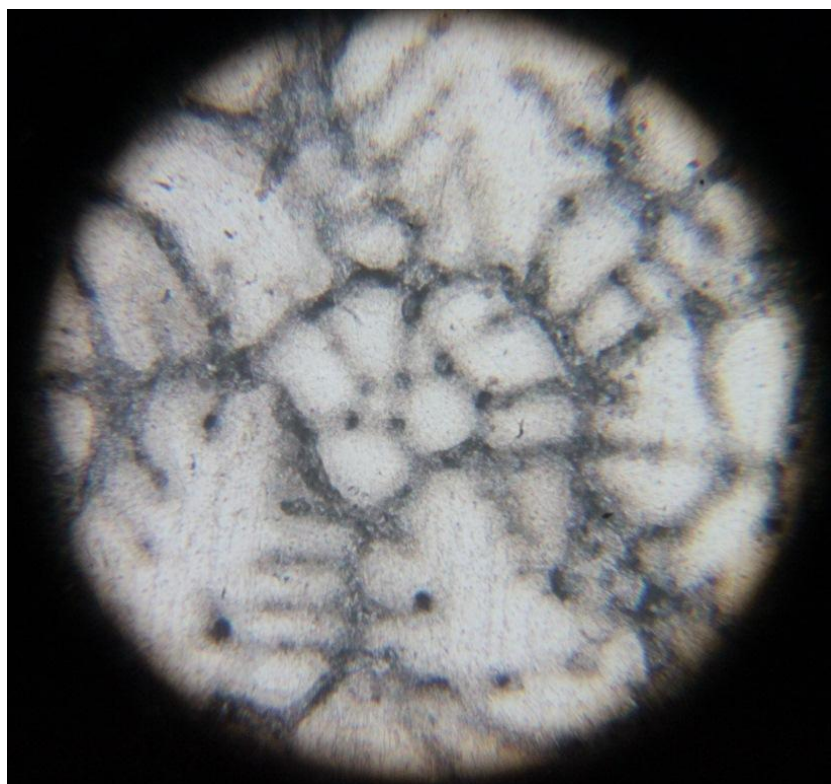


а) увеличение F8 – 37x400

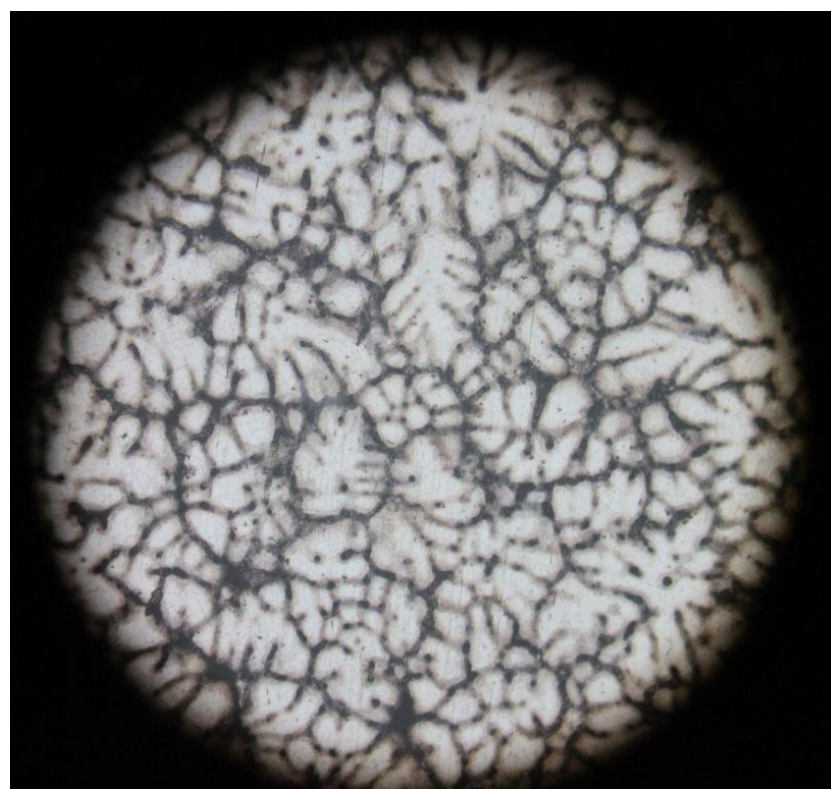


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 13- Сплав Zn (43,47%)- Al (55%)

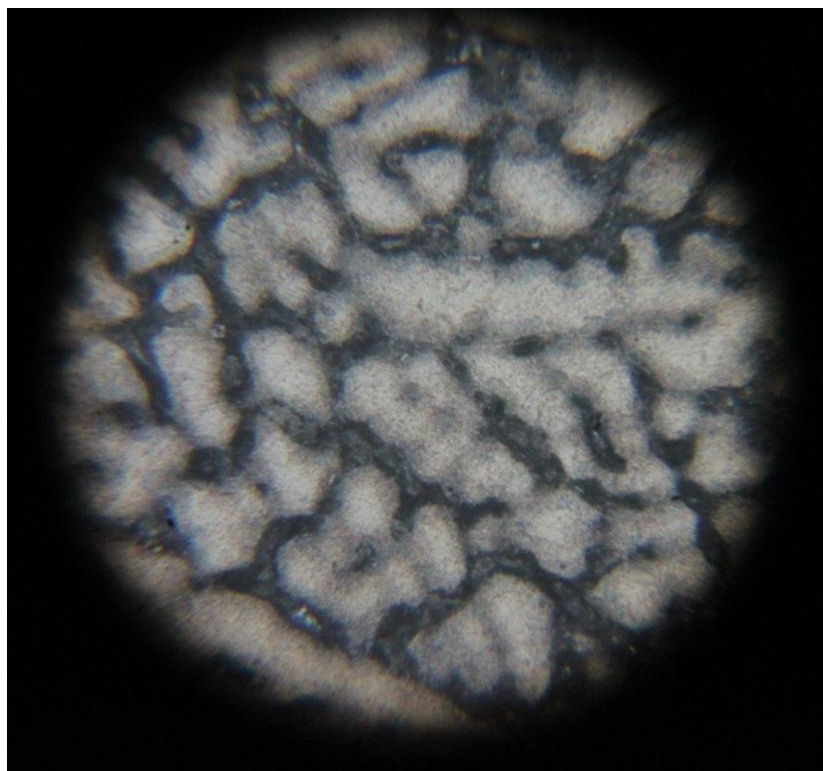


а) увеличение F8 – 37x400

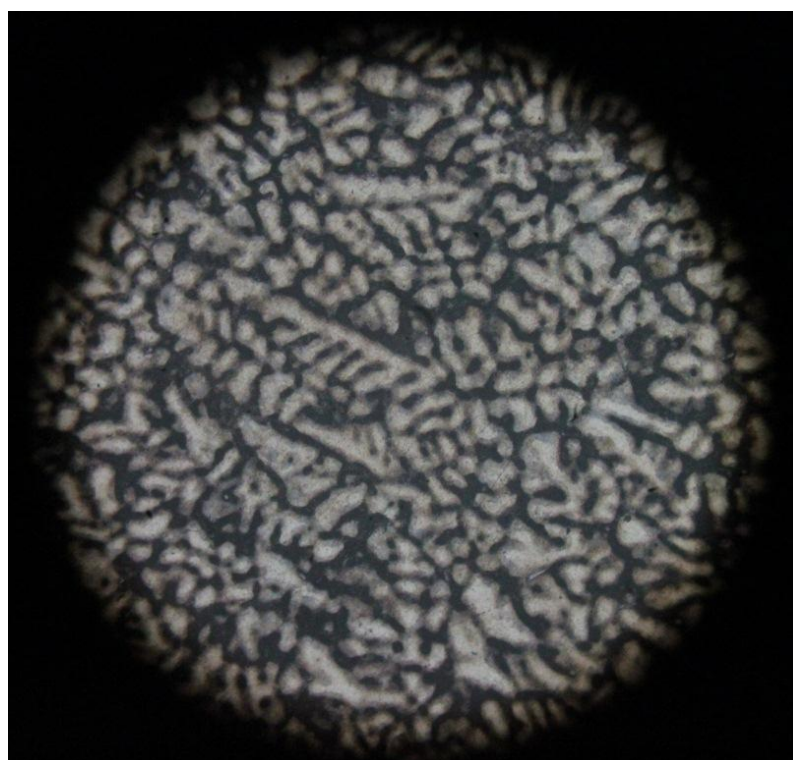


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 14- Сплав Zn (49,98%)- Al (50%)

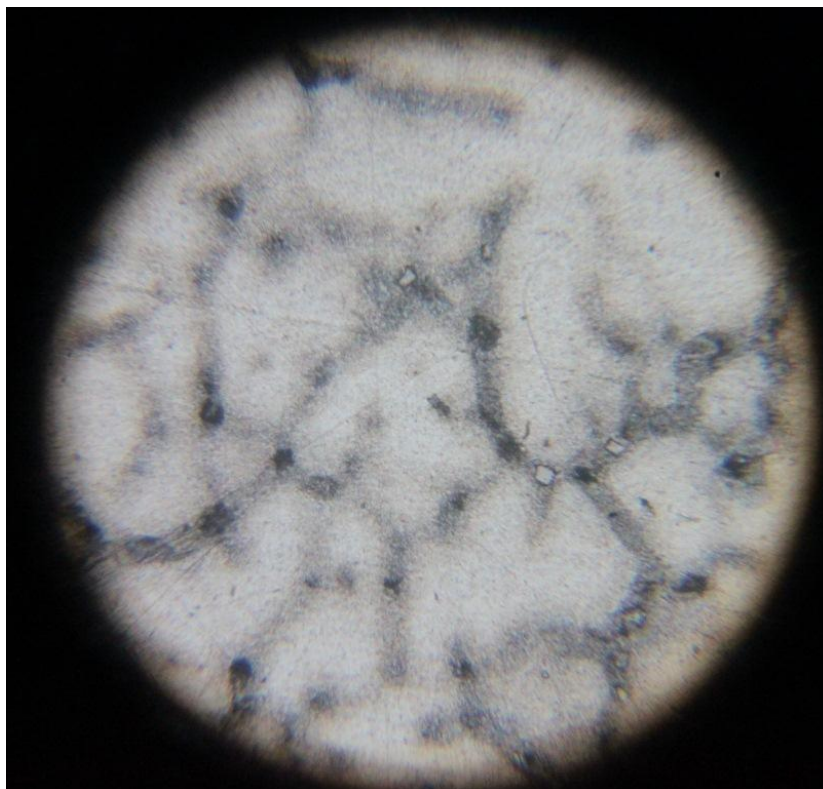


а) увеличение F8 – 37x400

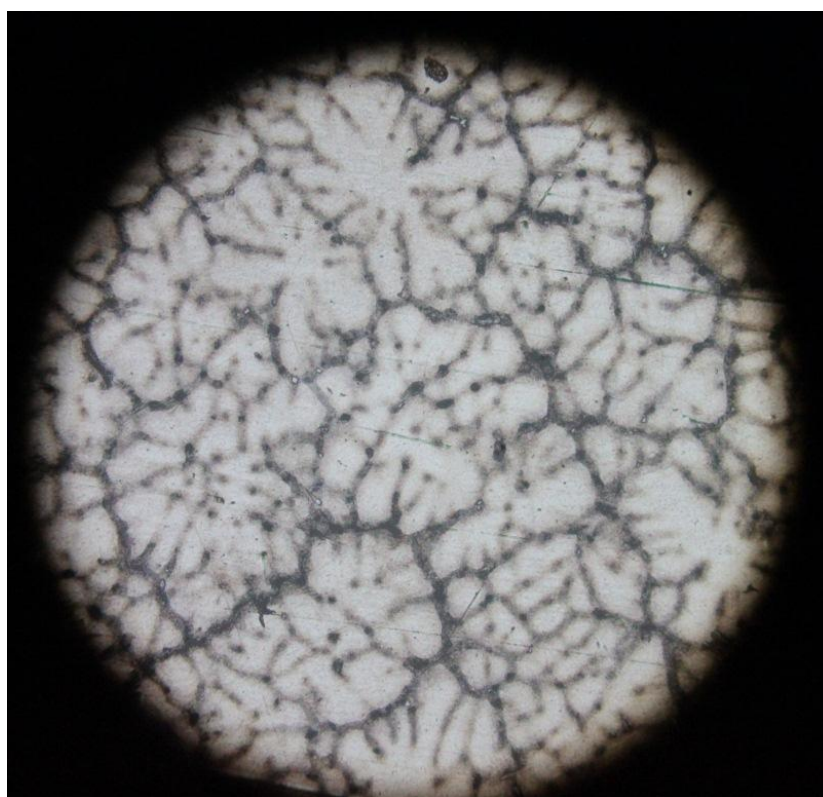


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 15- Сплав Zn (54,5%)- Al (45%)



а) увеличение F8 – 37x400

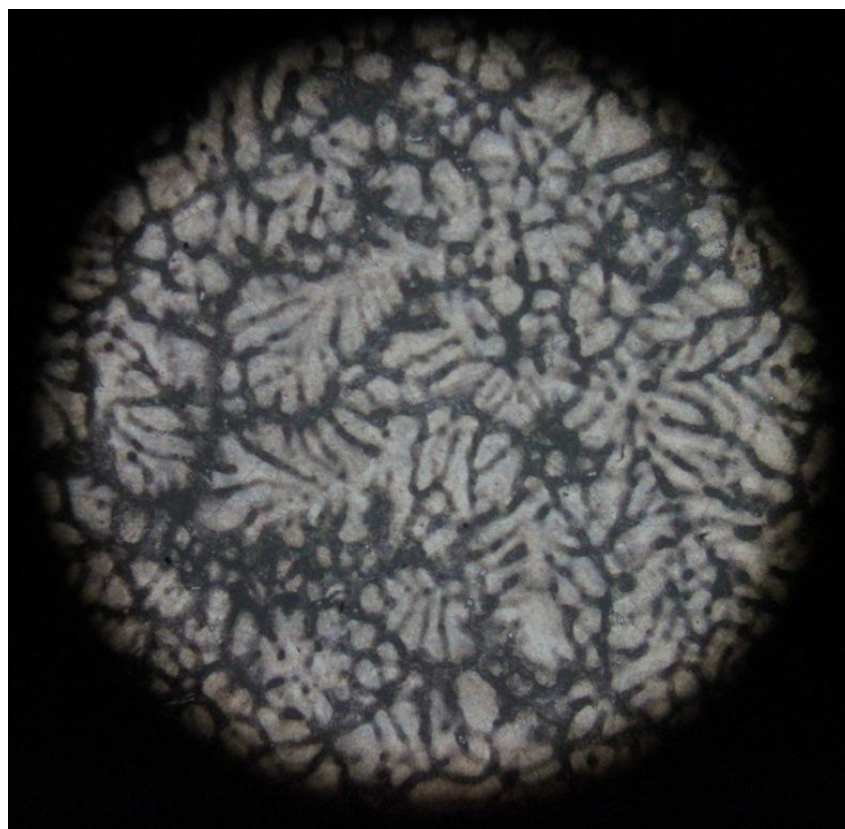


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 16- Сплав Zn (59,94%)- Al (40%)

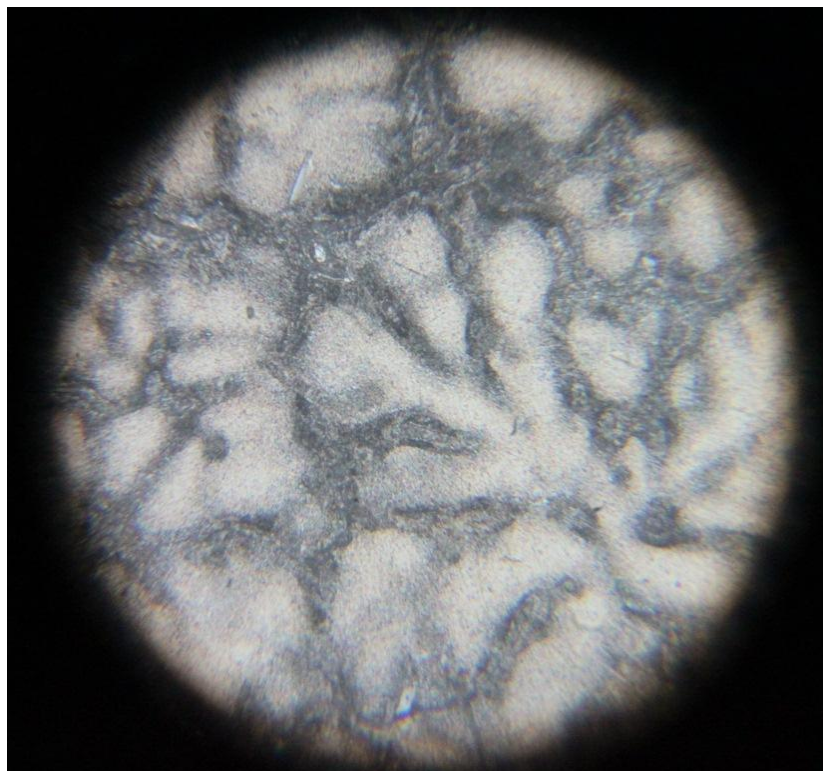


а) увеличение F8 – 37x400

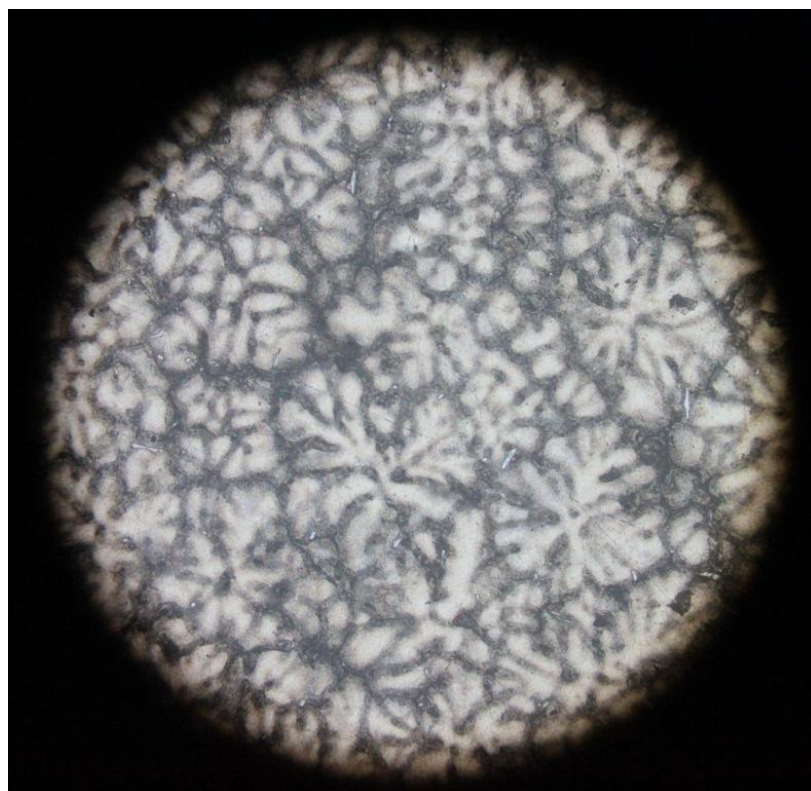


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 17- Сплав Zn (64,98%)- Al (35%)

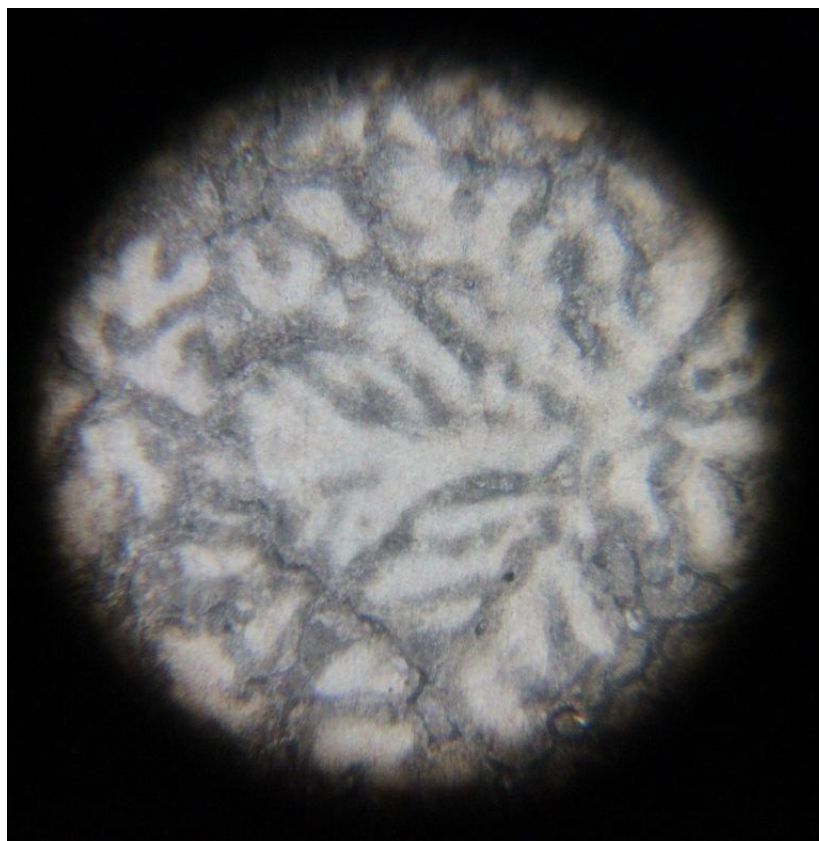


а) увеличение F8 – 37x400

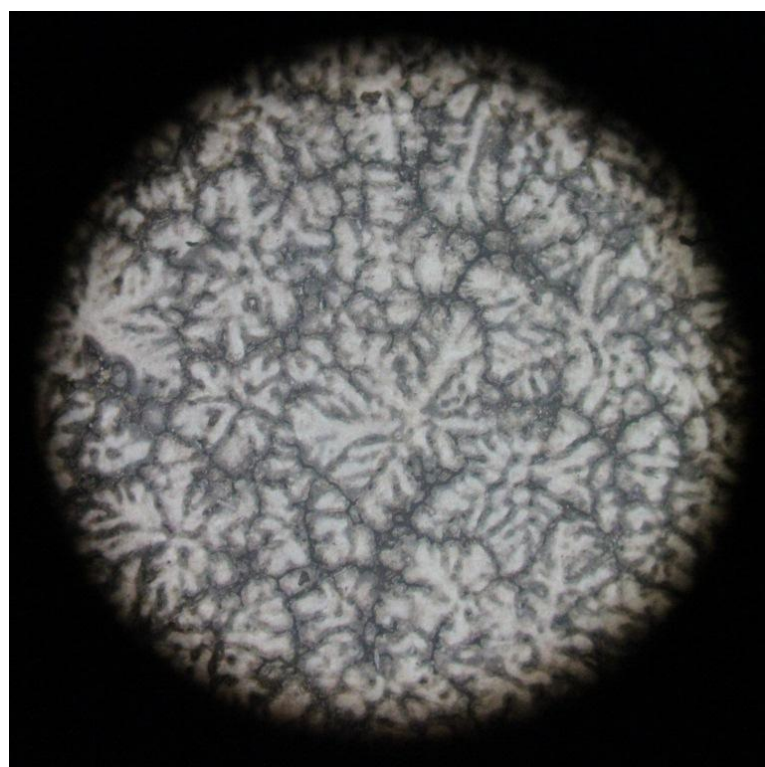


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 18- Сплав Zn (69,03%)- Al (30%)

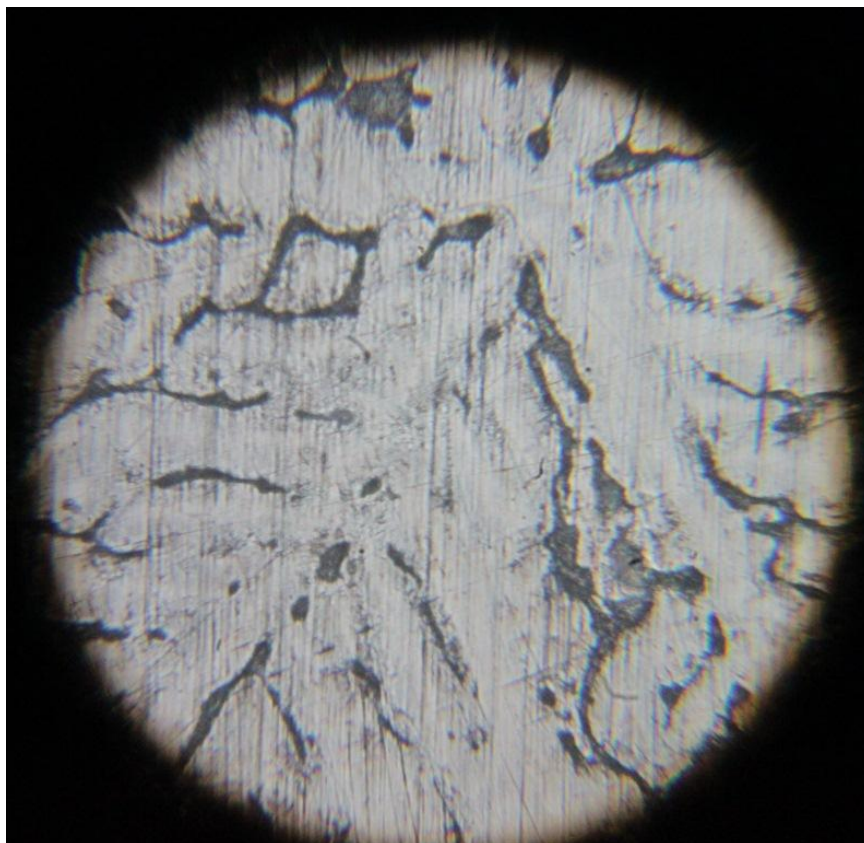


а) увеличение F8 – 37x400

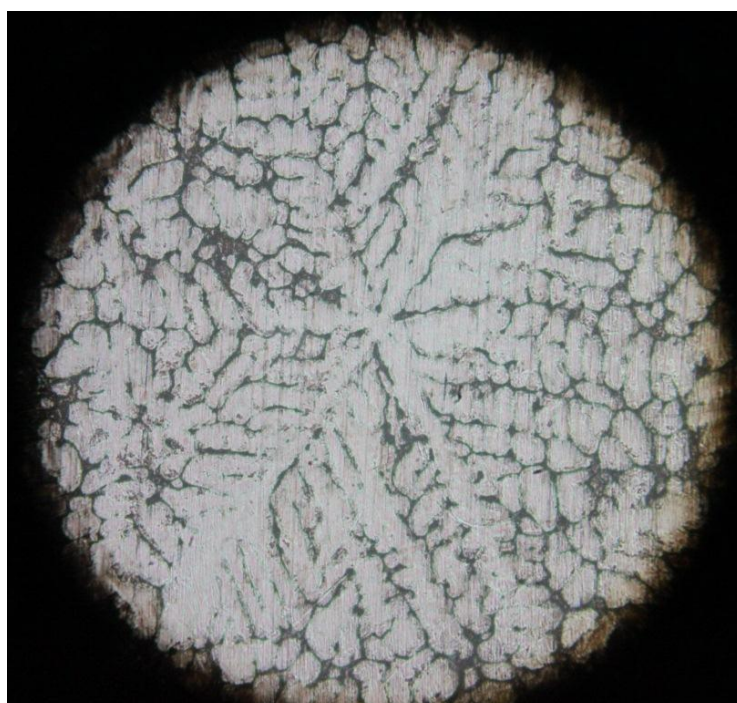


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 19- Сплав Zn (74,3%)- Al (25%)

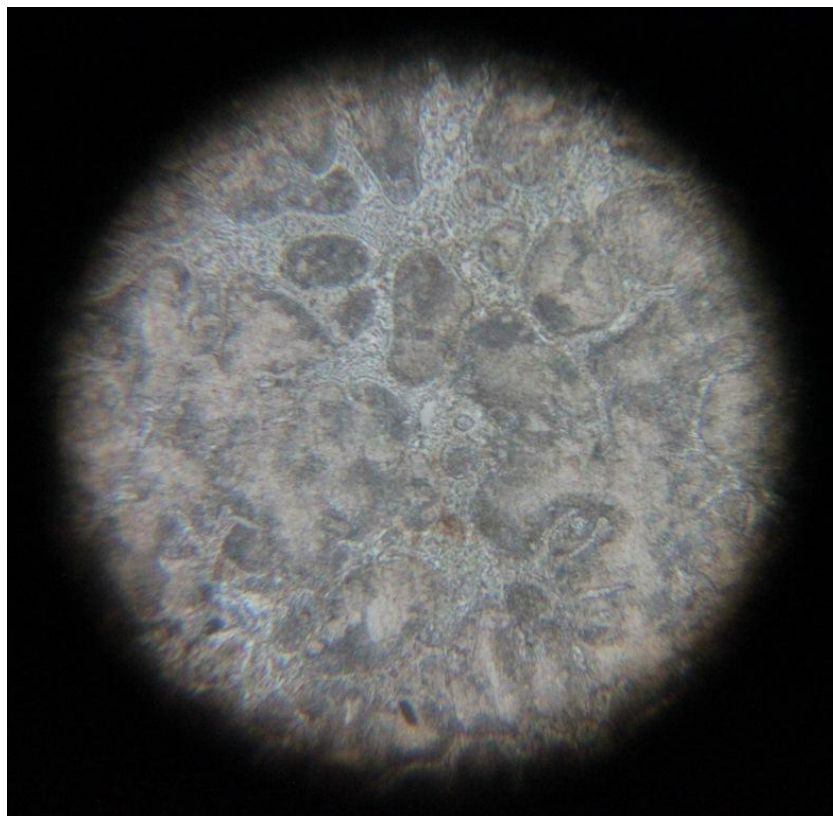


а) увеличение F8 – 37x400

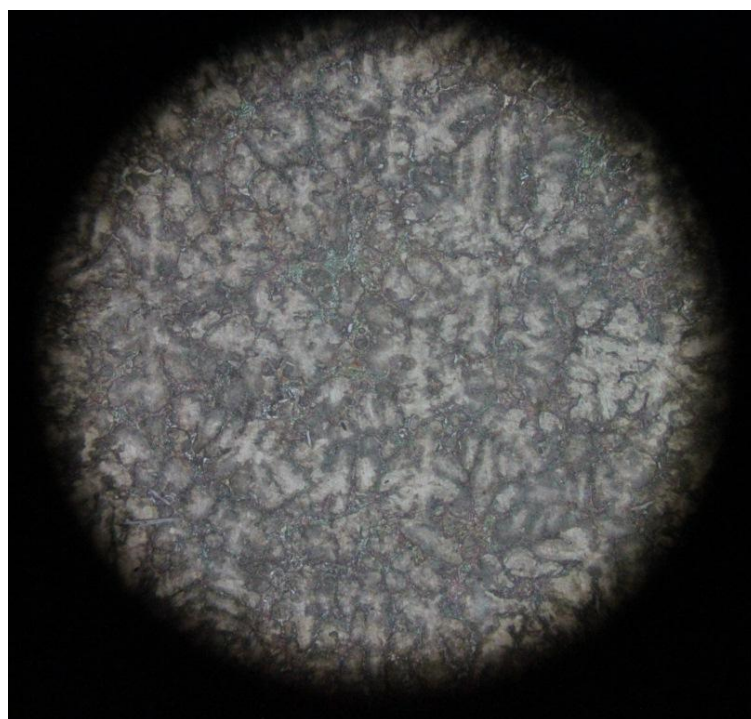


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 20- Сплав Zn (79,65%)- Al (20%)

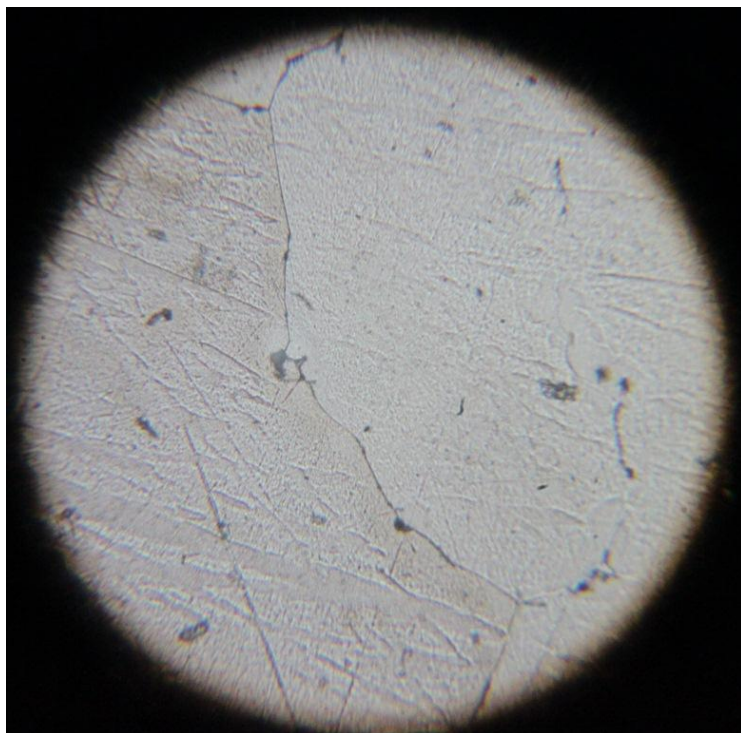


а) увеличение F8 – 37x400

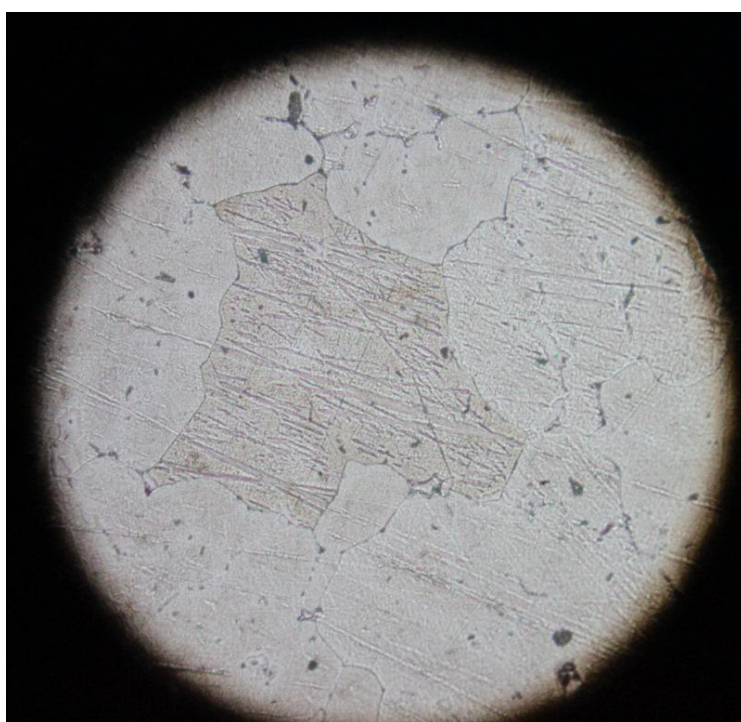


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 21- Сплав Zn (82,52%)- Al (15%)

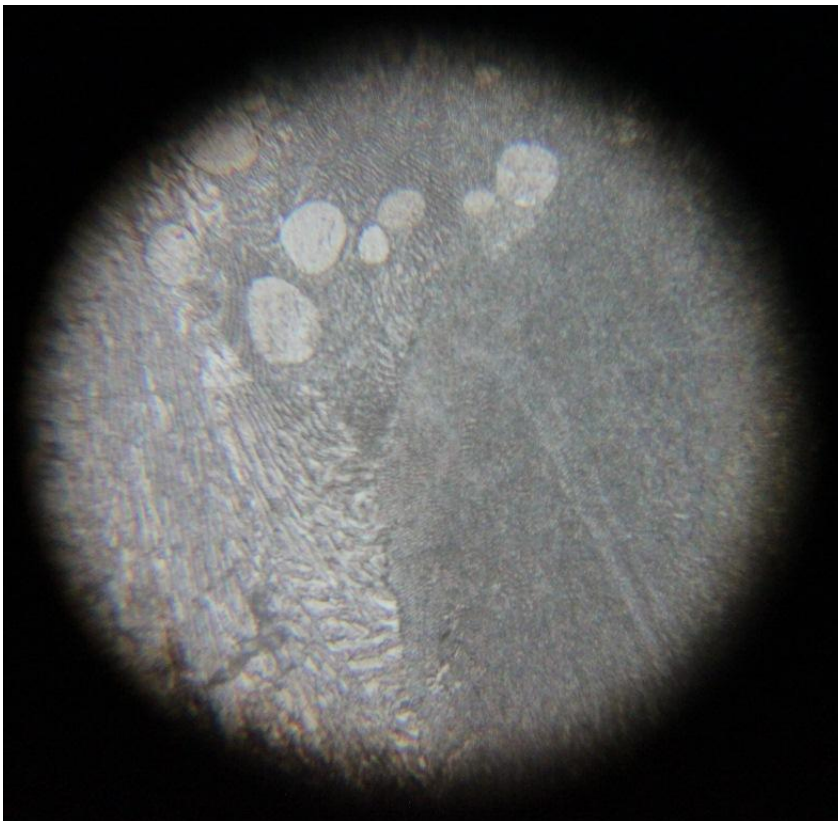
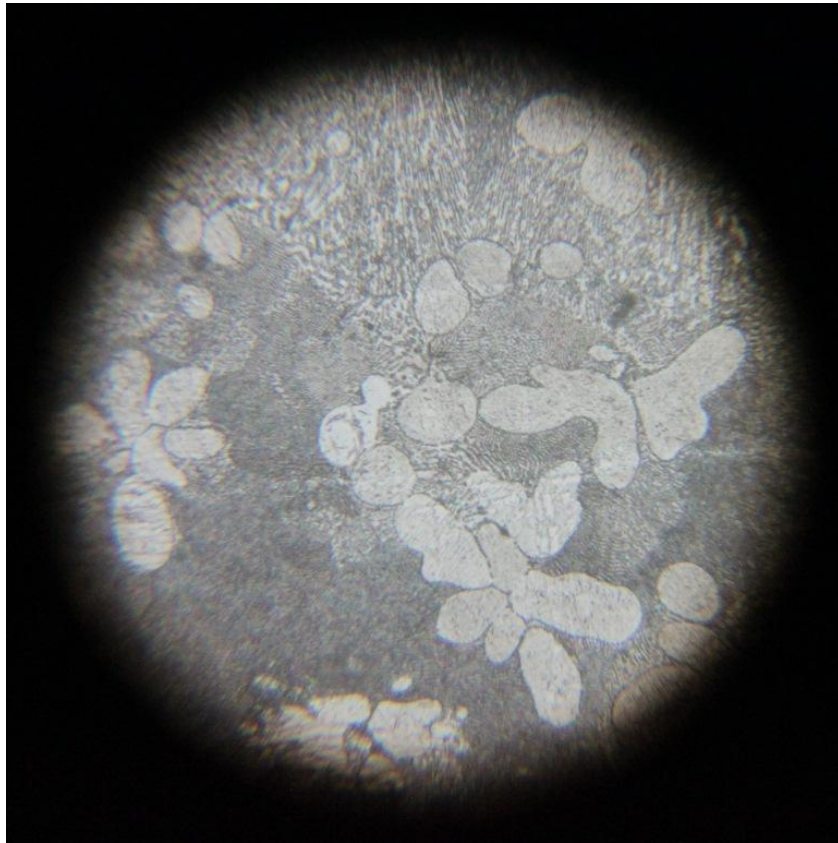


а) увеличение F8 – 37x400

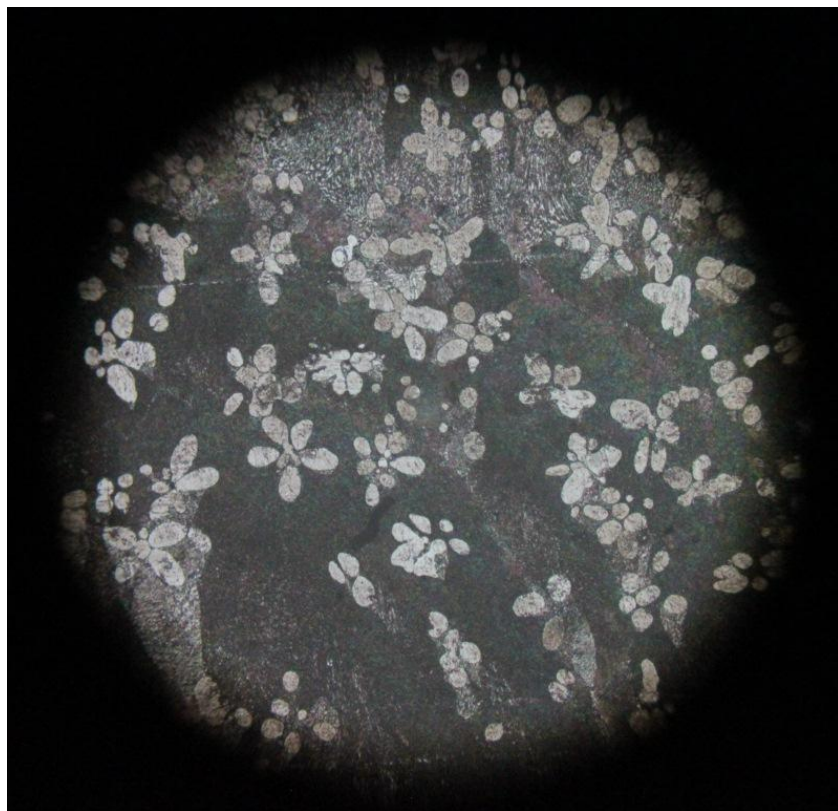
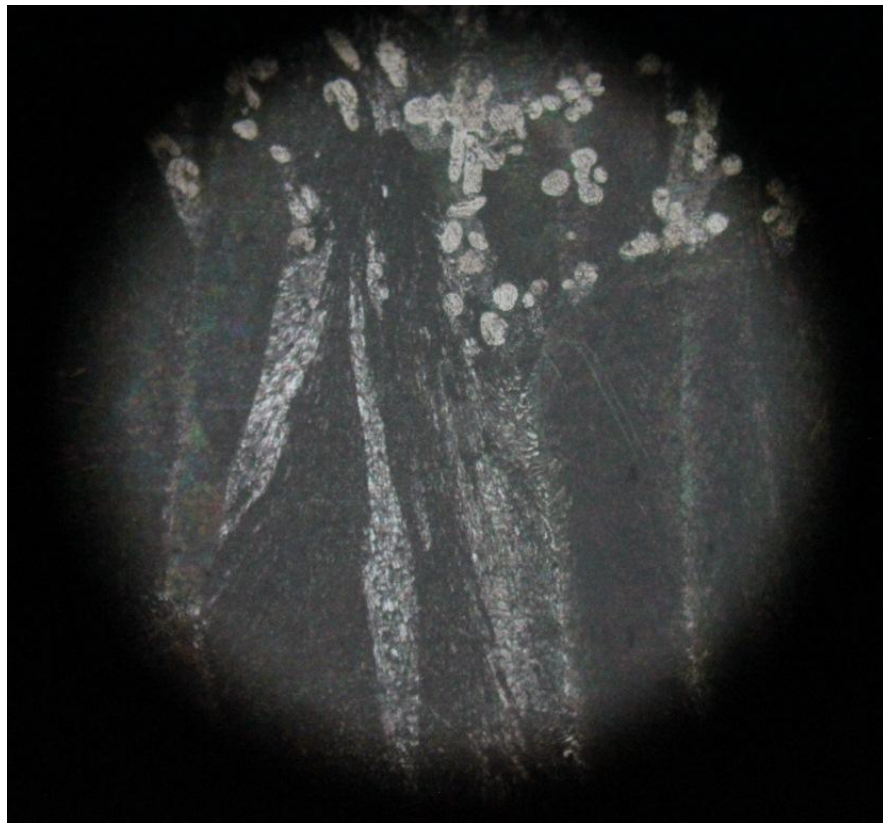


б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 22- Сплав Zn (88,85%)- Al (10%)



а) увеличение F8 – 37x400



б) увеличение F23 – 17x140

Рисунок 23- Сплав Zn (94,1%)- Al (5%)

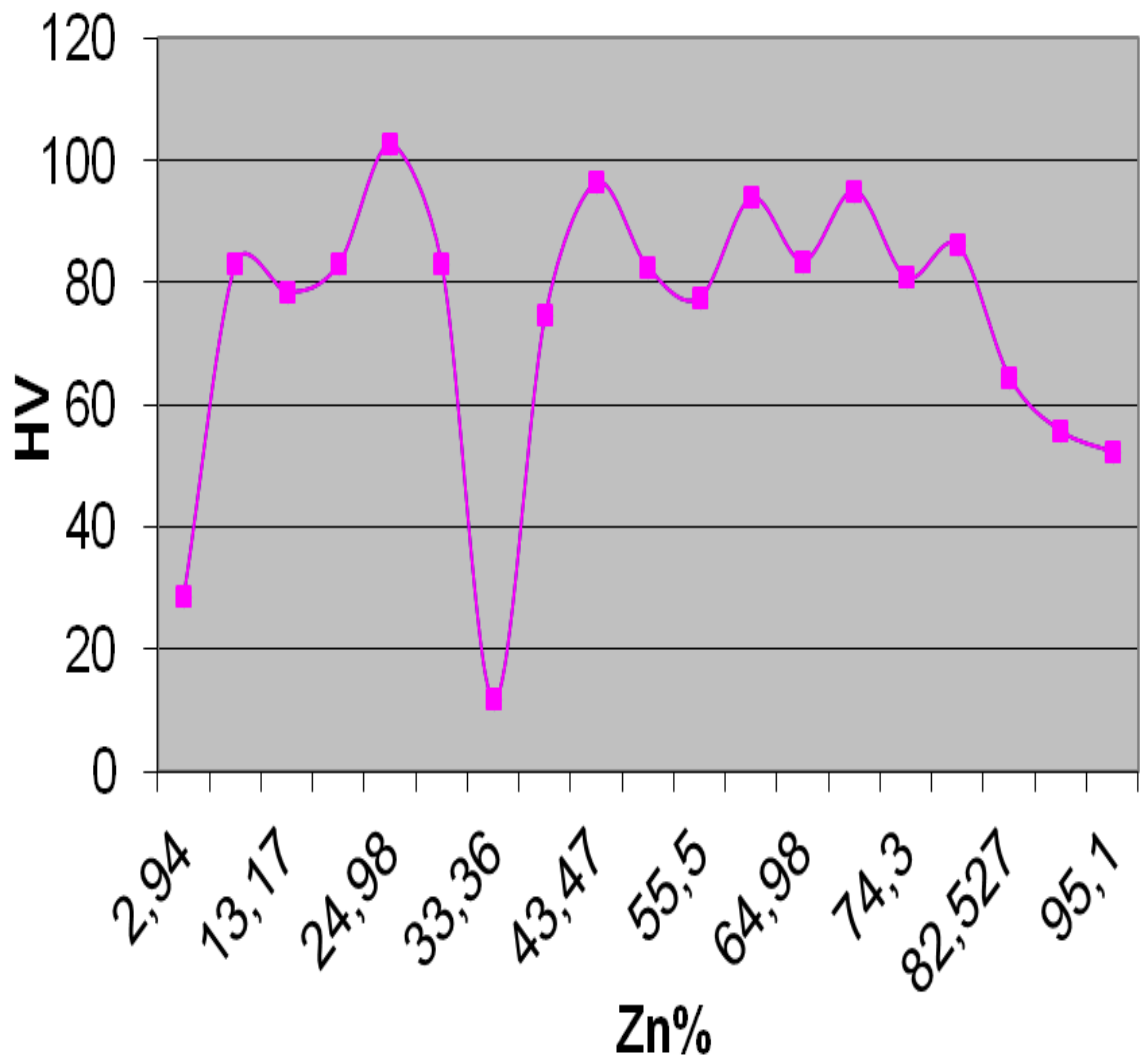


Рисунок 24 - Зависимость средней микротвердости сплава Al-Zn от содержания цинка.

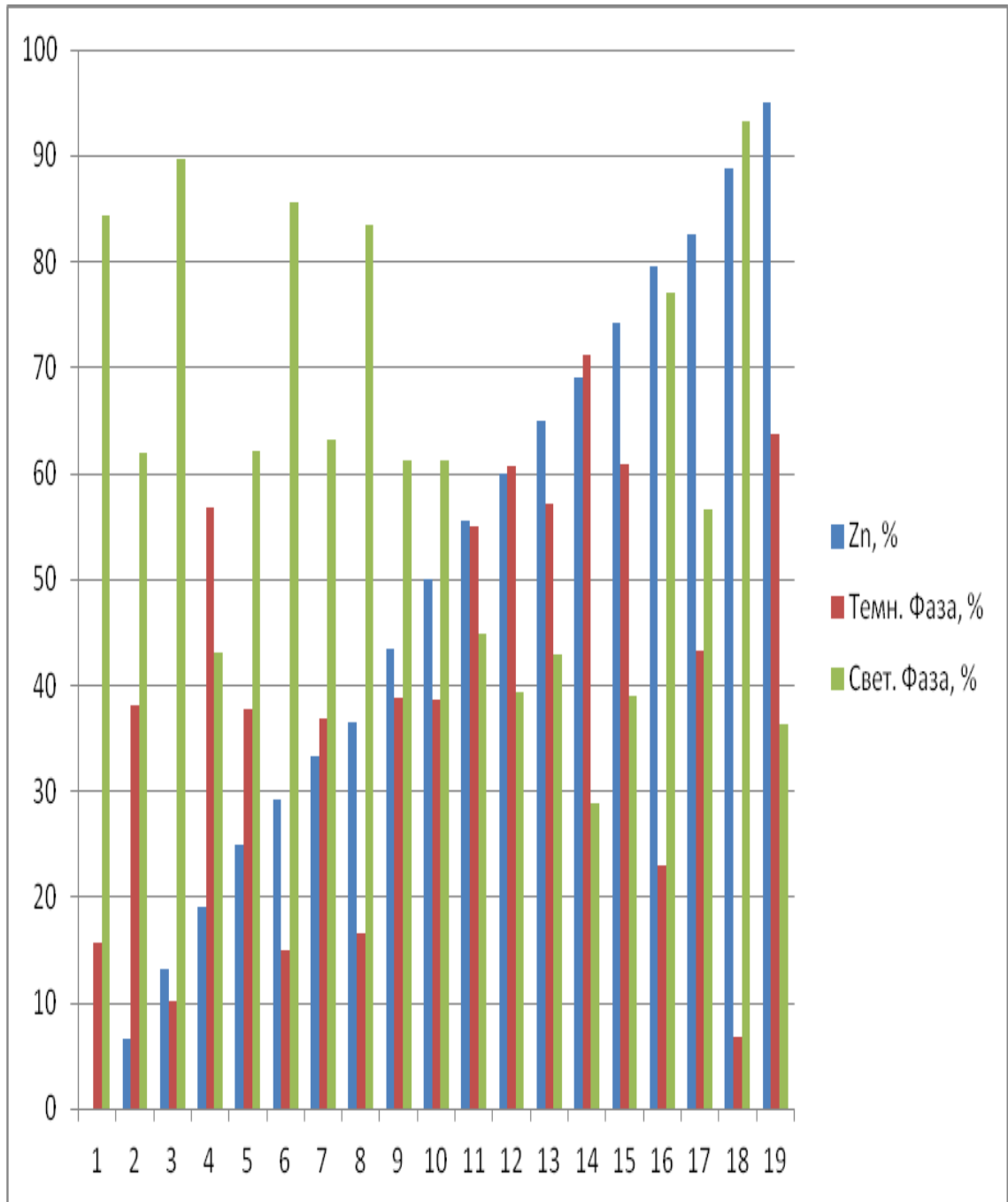


Рисунок 25 - Зависимость площади фаз в сплавах Al-Zn от концентрации Zn.

Рассмотрев свойства и применяемость сплавов с различным соотношением Al и Zn в системе Al-Zn, которые теоретически возможно получить при контактно - реактивном плавлении (процентное соотношение Al и Zn в приведенных данных может иметь погрешность $\pm 2\%$, т.к. имеются примеси):

- Цинк (Zn) 5%, Алюминий (Al) 95%;
- Цинк (Zn) 25%, Алюминий(Al) 75%;
- Цинк (Zn) 50%, Алюминий(Al) 50%;
- Цинк (Zn) 75%, Алюминий(Al) 25%;
- Цинк (Zn) 95%, Алюминий(Al) 5%.

При соотношении в сплаве Zn 5% и приблизительно Al 95% для сравнения можно как пример привести алюминиевый деформируемый сплав В95. Примеси в сплаве составляют приблизительно 5-6%, алюминий приблизительно 92%, остальное цинк. Его твердость $HV_{10}^{-1} = 125$ МПа, температура плавления 480°C , предел прочности при растяжении 520 МПа. Сплав не является теплопрочным и при эксплуатации в длительный период его возможно применять до температуры не выше $100-120^{\circ}\text{C}$. «Сплав В95 применим для конструкций с высокой нагрузкой, эксплуатируемых в условиях напряжений сжатия (лонжероны самолетов и другие детали)»[6].

Для рассмотрения сплава с содержанием Al 25% и приблизительным содержанием Zn 75%, не было найдено аналога, но можно сослаться на патент. В нём описывается сплав на основе цинка, с содержанием алюминия 20-30% и примесей 3,7-4,7%. «Марганец, хром и молибден в ходящие в сплав снижают пористость и повышают механические свойства сплава. Алюминий упрочняет твердый раствор. Титан и цирконий снижают усадку сплава, уменьшают склонность к образованию трещин. Сплав может быть использован для изготовления корпусов карбюраторов, насосов, рам спидометров, деталей бытовой техники»[7].

Для соотношения Zn 95% и Al 5% можно взять за аналог цинковый литейный сплав ЦА4. Его твердость $HV_{10}^{-1} = 75$ МПа, температура плавления 381-387°C, прочности предел при растяжении 250 МПа. «Сплав ЦА4 используется для отливки ответственных деталей, требующих стабильных размеров, в автомобильной, тракторной, электротехнической и других отраслях промышленности»[8].

Для сплавов с содержанием элементов Zn 25% - Al 75% и Zn 50% - Al 50% не было найдено аналогов. Возможно сплавы с таким процентным содержанием элементов не нашли применения.

3. Результаты исследований

Для исследования, выбирали сплав алюминия плакированного силумином АМц 6. Сплав АМц6 - алюминиевый деформируемый сплав, применяется для изготовления сварных баков, бензо- и маслопроводов, радиаторов и т.д. Имеет высокую стойкость к агрессивным средам и коррозии.

Химический состав сплава АМц6 представлен в Таблице 10, механические свойства материала представлены в Таблице 11 и его физические свойства представлены в Таблице 12 являются входными параметрами эксперимента.

Выходными параметрами в данном эксперименте будут прочность соединения и усилие при разрушении. Прочность соединения зависит от многих параметров, но одним из главных параметров будет герметичность конструкции, от этого параметра зависит отсутствие кислорода в зазоре. Усилие разрушения будет зависеть от размеров испытываемого образца и качества спаянности образцов.[16]

Таблица 10 Химический состав алюминиевого сплава марки АМц6, массовая доля элементов в %

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Примеси
до 0,7	до 0,6	1-1,6	до 0,2	96,35-99	до 0,15	до 0,2	до 0,1	прочие, каждая 0,05; всего 0,1

Таблица 11 Мех. свойства алюминия марки АМц 6

Сортамент	Размер	Напр.	σ_s	σ_t	δ_s	ψ	КСУ	Термообработка
-	мм	-	МПа	МПа	%	%	кДж/м ²	-
Лист отожжен			110	60	25			

Твердость материала АМцб по Бринеллю, сплав отожженный НВ 10 = 30
МПа

Предел кратковременной прочности, [МПа] - σ_B

Предел пропорциональности (предел текучести), [МПа] - σ_T

Относительное удлинение при разрыве, [%]- δ_5

Относительное сужение, [%]- ψ

Ударная вязкость, [кДж / м]- КСУ

Твердость по Бринеллю, [МПа]- НВ

Таблица 12 Физические свойства сплава на основе алюминия марки АМц 6

T	E 10 ⁻³	α 10 ⁵	l	γ	C	R 10 ³
°C	МПа		Вт/(м ² ·град)	кз/м ³	Дж/(кз ² ·град)	Ом·м
20	0,71			2730		34,5
100		23,2	180		1090	
200		25				

Для пайки алюминия использовали припои системы алюминий – кремний (Al – Si), представленные на диаграмме состояния на Рисунке 3 и припои системы алюминий – цинк (Al-Zn), диаграмма состояния которого представлена на Рисунке 25.

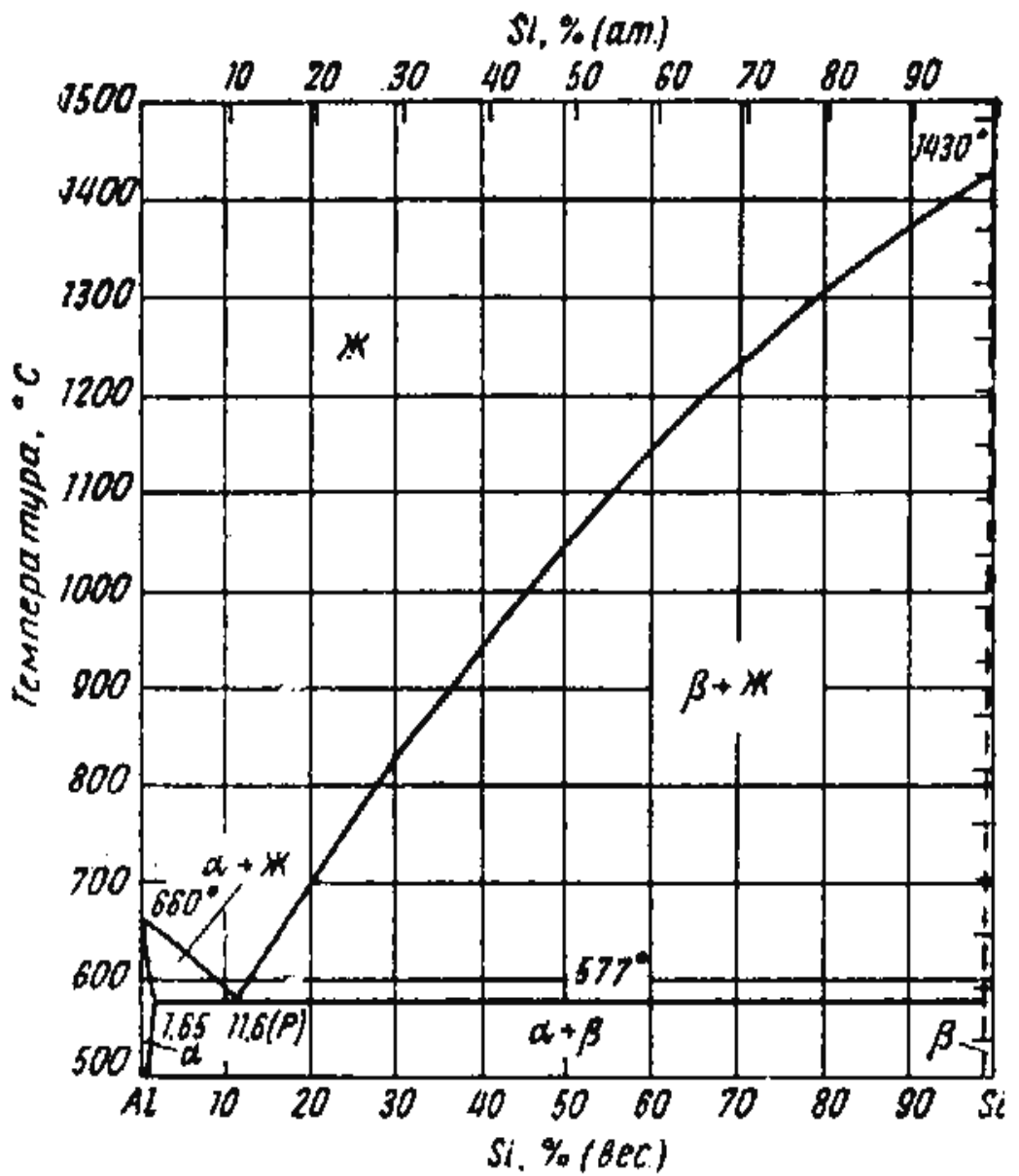


Рисунок 26 – Диаграмма состояния сплавов системы алюминий–кремний (Al-Si)

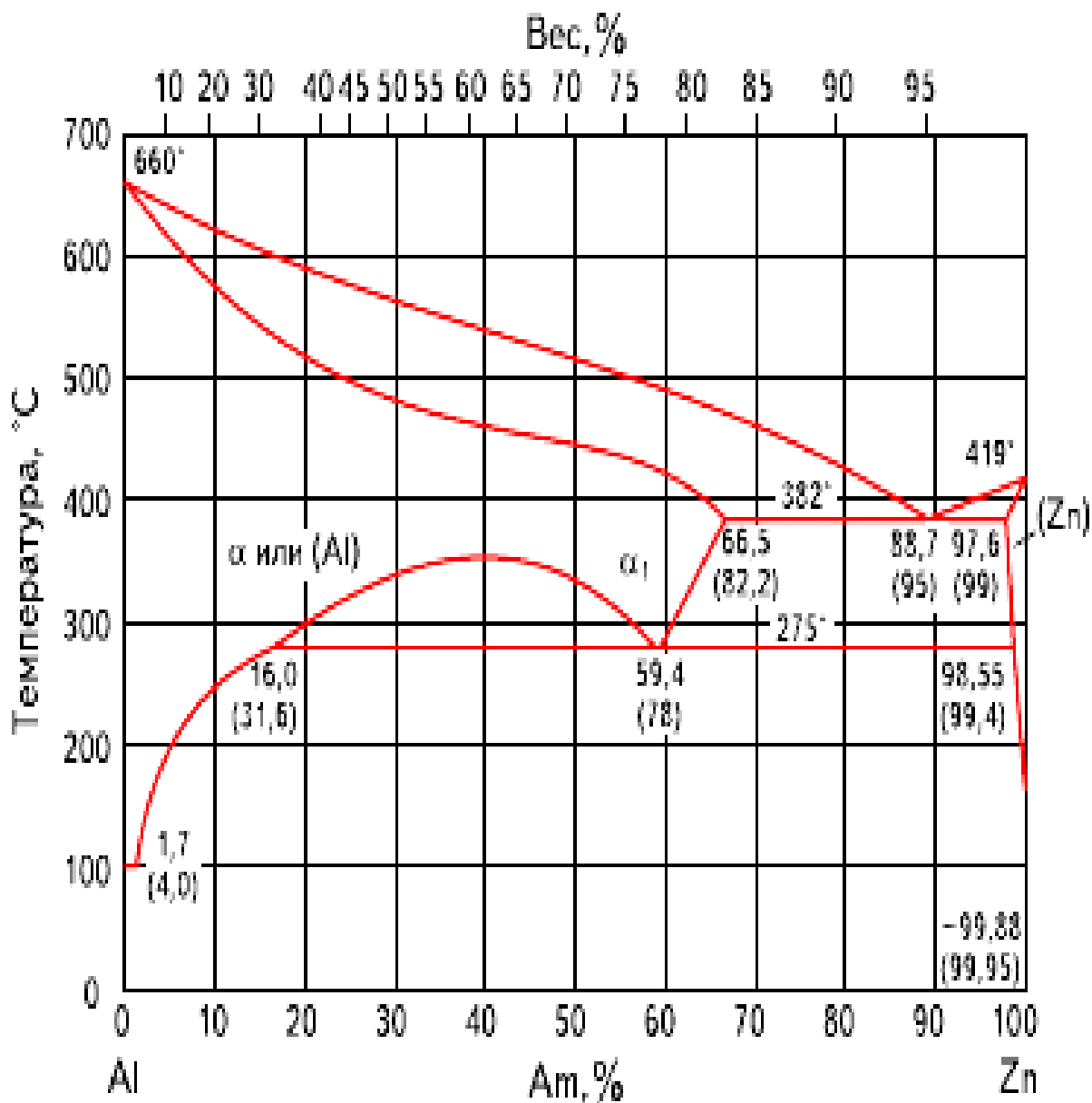


Рисунок 27 – Диаграмма состояния сплавов системы алюминий-цинк (Al-Zn)

Опыт №1 Материал образцов – алюминиевый сплав АМц. Размеры образцов: толщина - 10 мм, ширина - 100 мм, длина – 160 мм.

Применяемый припой: аморфный припой СТЕМЕТ 1501.

Химический состав:

Кремний - 11-13%

Железо - до 0,1%

Марганец - до 0,1%

Алюминий – ост.

Температура плавления - 580°C

Температура пайки - 600-620°C

Перед пайкой проводилась подготовка поверхности образцов:

- 1) очистка поверхности образцов наждачной бумагой от грязи
- 2) травление в ванне из водного раствора 60—160 г/л NaOH при температуре 60-90°C; время травления 1—2 мин.
- 3) промывка в проточной воде;
- 4) осветление в 30% водном растворе HNO₃ при комнатной температуре в течение 1—2 мин;
- 5) промывка в проточной воде;
- 6) сушка образцов.

Сварка образца производилась сразу после очистки. Перед сваркой припой помещался в паяльный зазор в три слоя, паяльный зазор был неравномерным, но не больше 1мм по всей площади. Размеры паяного соединения составляли по ширине 100 мм и по длине 130 мм. После сварки образцы охлаждали до комнатной температуры.

Перед пайкой в верхнюю пластину зачеканивалась термопара. Пайка проводилась при температуре 610°C с выдержкой при этой температуре 10 минут. Время нагрева до нужной температуры составляет 25 минут.

Таблица 13 -Время цикла пайки

Время нагрева и выдержки, <u>мин:сек</u>	Температура, °C
0:00	100
0:10	200
0:40	300
2:30	400
6:50	500
20:00	600
25:00	610
35:00	610

Результаты.

После пайки образцы разрезались на полосы шириной 7-10 мм на ленточной машине с охлаждением полотна, рисунок 28. Результаты визуального контроля показали, что пайка прошла успешно – образцы спаялись, местами паяного шва не видно даже на макрошлифах. Из характерных дефектов имеют место непропаи вблизи сварных швов.



Рисунок 28 – Ленточная машина JET

Опыт №4. В качестве заготовки припоя применяли цинк (содержание Zn – 99,9% ,остальное примеси 0,1%), который в результате процесса контактно-реактивного плавления при взаимодействии с алюминием образует припой системы (Al-Zn). Температура пайки 480-500°C.

При проведении исследований пользовались следующим оборудованием:

- плита с электрическим нагревом;
- шкаф сушильный;

- аргодуговая сварка УДГУ 351 АС /DC (Рисунок 29);
 - печь СНОЛ – 4 (Рисунок 30);
 - машина разрывная УММ –5 (Рисунок 31);
 - микротвердомер ПМТ-3 (Рисунок 32);
 - микроскоп МБС-2 (Рисунок 33).
- микроскоп МИМ 8 (Рисунок 34)



Рисунок 29 - аргодуговая сварка УДГУ 351 АС /DC



Рисунок 30 - печь СНОЛ 12



Рисунок 31 - машина разрывная УММ –5



Рисунок 32 - микротвердомер ПМТ-3



Рисунок 33 - микроскоп МБС-2



Рисунок 34 – микроскоп МММ 8

При проведении экспериментального исследования использовались следующие приспособления и материалы:

- пинцет большой;
- емкости для растворов;
- ХА термopара.
- потенциометр ОВЕН (Рисунок 35)
- 30% -ый раствор HNO_3 ;
- 30% раствор NaOH ;
- техническая вата;
- спирт;



Рисунок 35 – потенциометр ОВЕН

Для проведения исследования, нарезаются пластины из алюминиевого сплава марки АМцб габаритными размерами: 100x50x5 мм.

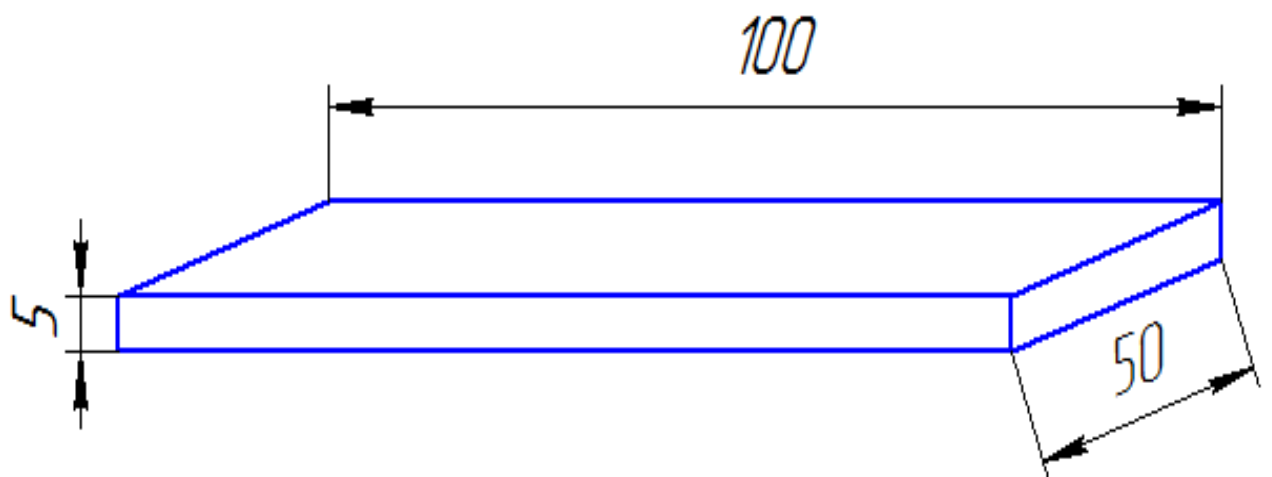


Рисунок 36 - Эскиз образца под пайку.

Этапы подготовки образцов к пайке:

1) Химическое травление образцов перед пайкой

Травление образцов производится в растворе гидроксида натрия 50-160 г/литр (15-30% NaOH в 1 литре воды), для проведения опыта концентрация раствора устанавливается в соотношении 80 г/литр, температура процесса травления опытных образцов устанавливается на 80°C. После химического травления образцы промываются в проточной воде.

2) Осветление после травления

Осветление экспериментальных образцов проводить в 30 %-ом растворе азотной кислоты (HNO₃). После процесса осветления образцы промываются в проточной воде и высушиваются в сушильном шкафу.

3) Подготовка перед пайкой припоя

Припой очищается и обезжиривается этиловым спиртом технической ватой.

4) Припой закладывается в паяльный зазор внахлест деталей.

5) Образцы завариваются сваркой в аргоне по контуру соприкосновения деталей (пластин), Рисунке 37

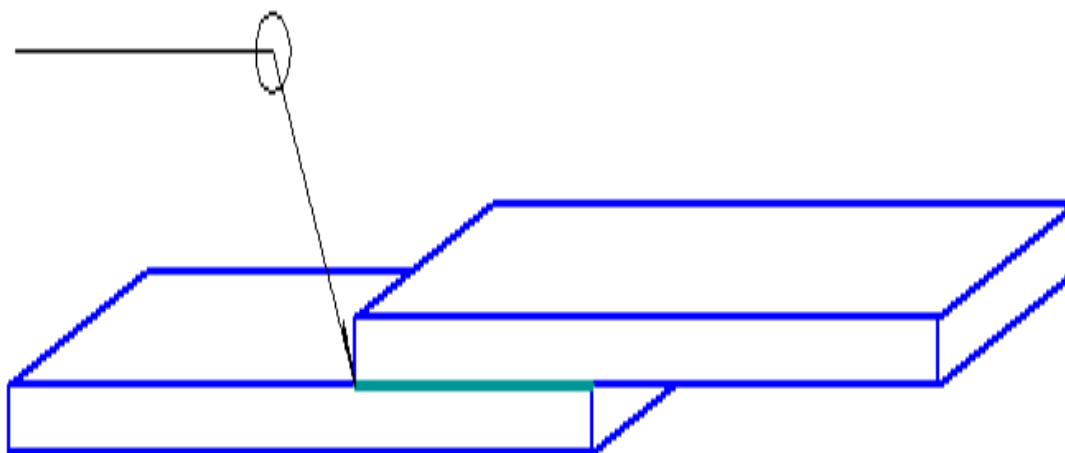


Рисунок 37 – Аргондуговая сварка образцов

Процесс пайки

Образцы с заваренным зазором загружаются в печь, выведенную до требуемой температуры. Температура пайки выбирается в зависимости от применяемого припоя.

Перед процессом пайки к образцам присоединяется термопара для контроля нагрева. При выходе на температуру пайки образцы выдерживаются 10 минут. Затем выгружаем образцы из печи и охлаждаем на воздухе.

В процессе исследования были проведены серии опытов при различных режимах пайки с разными припоями, скорости их нагрева представлены в Таблице 14, Таблице 15 и в Таблице 16

Таблица 14 – Скорость нагрева при использовании припоя СТЕМЕТ 1501.

T, °C	t, мин : сек
100	-
200	-
300	0:40
400	2:30
500	6:50
600	20:00
610	25:00
610	35:00

Таблица 15 – Скорость нагрева при применении припоя Al-Si-Ge.

T, °C	t, мин : сек
100	-
200	0:30
300	0:53
400	1:43
500	3:44
600	11:02
610	14:07
610	24:07

Таблица 16 –Скорость нагрева при применении цинковой заготовки для образования припоя системы Al-Zn

№	1	2	3	4	5	6	7	8
T, °C	t, МИН	t, МИН	t, МИН	t, МИН	t, МИН	t, МИН	t, МИН	t, МИН
100	0'20	0'15	0'10	-	0'21	0'52	0'08	0'31
200	1'26	0'36	0'20	0'40	1'16	0'30	3'13	1'27
300	3'55	1'33	0'40	1'10	3'00	5'59	8'18	2'50
400	9'17	3'33	1'41	3'06	6'44	11'24	18'47	5'27
410	9'56	-	-	-	-	-	-	-
420	10'45	-	-	-	-	-	-	-
430	11'33	-	-	-	-	-	-	-
450	-	5'20	-	-	-	-	26'12	7'41
460	-	5'50	-	-	-	-	26'34	8'26
470	-	6'24	-	-	-	-	27'01	9'18
480	-	7'00	-	-	-	-	28'05	10'25
тобщ., МИН	21'33	17'00	-	-	-	-	38'05	20'25

Продолжение Таблицы 16

T, °C	t, МИН	t, МИН	t, МИН	t, МИН	t, МИН	t, МИН	t, МИН	t, МИН
500	-	-	3'36	14'32	18'07	20'45	-	-
510	-	-	-	16'58	-	-	-	-
520	-	-	-	20'44	-	-	-	-
530	-	-	-	23'12	-	-	-	-
550	-	-	5'15	-	-	-	-	-
560	-	-	5'43	-	-	-	-	-
570	-	-	6'32	-	-	-	-	-
580	-	-	8'35	-	-	-	-	-
тобщ., МИН	21'33	17'00	18'35	33'12	28'07	30'45	38'05	20'25

После процесса остывания паяные образцы нарезаются на образцы 10мм для получения большего количества образцов с паяным швом, как показано на Рисунке 29 Образцы находящиеся по периметру сварного шва не используются в дальнейших исследованиях. Оставшиеся сварные швы вырезаются, как показано на Рисунке 7 Это необходимо для испытания паяных образцов на срез и для дальнейшего исследования их структуры.

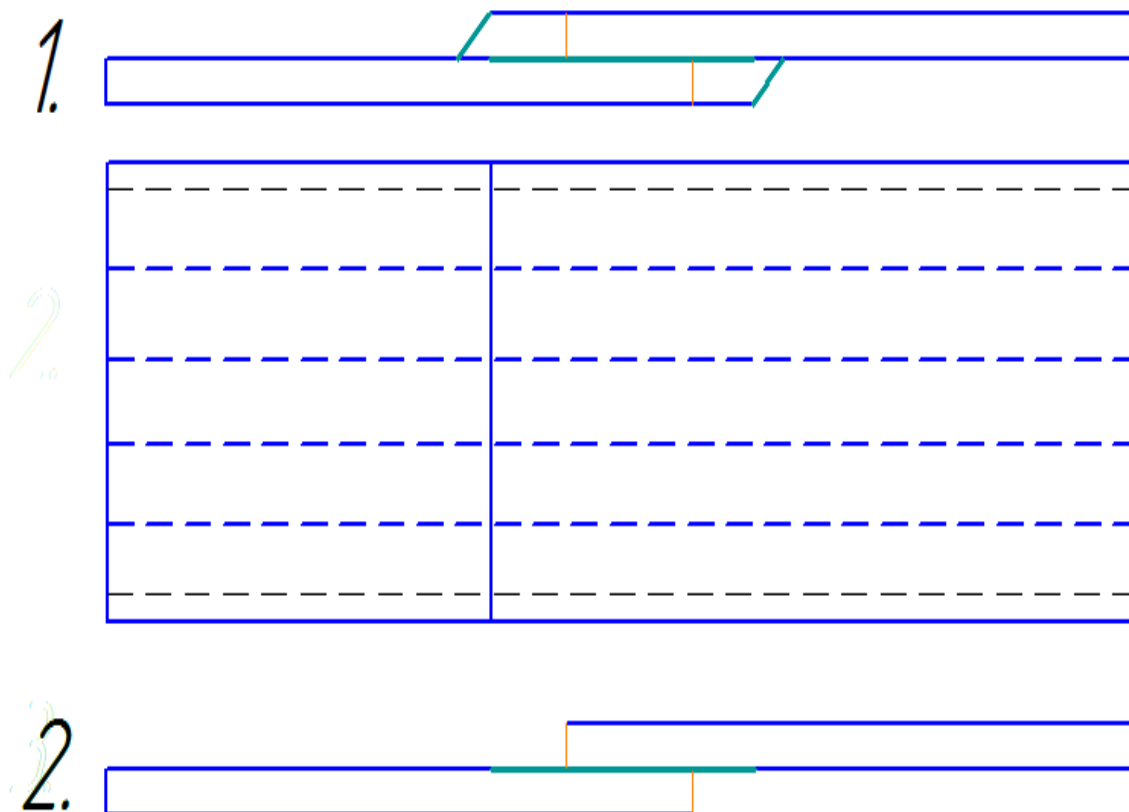


Рисунок 29 - Разметка и обрезка образцов.

В результате проведенных исследований были проверены режимы автовакуумной пайки алюминиевых образцов с применением припоев систем Al-Si-Ge и Al-Zn, так же получены данные о прочности и микротвердости соединений.

При автовакуумной пайке алюминия припоями системы Al-Si-Ge соединения не образовалось, далее эти образцы не рассматривались.

При проведении процесса пайки образцов из алюминия с использованием в качестве припоя цинковой заготовки было отмечено явление взаимодействия припоя с основным металлом, это видно из Рисунка 38. При рассмотрении макроструктуры хорошо видно как цинк взаимодействует с алюминием, Рисунок 39

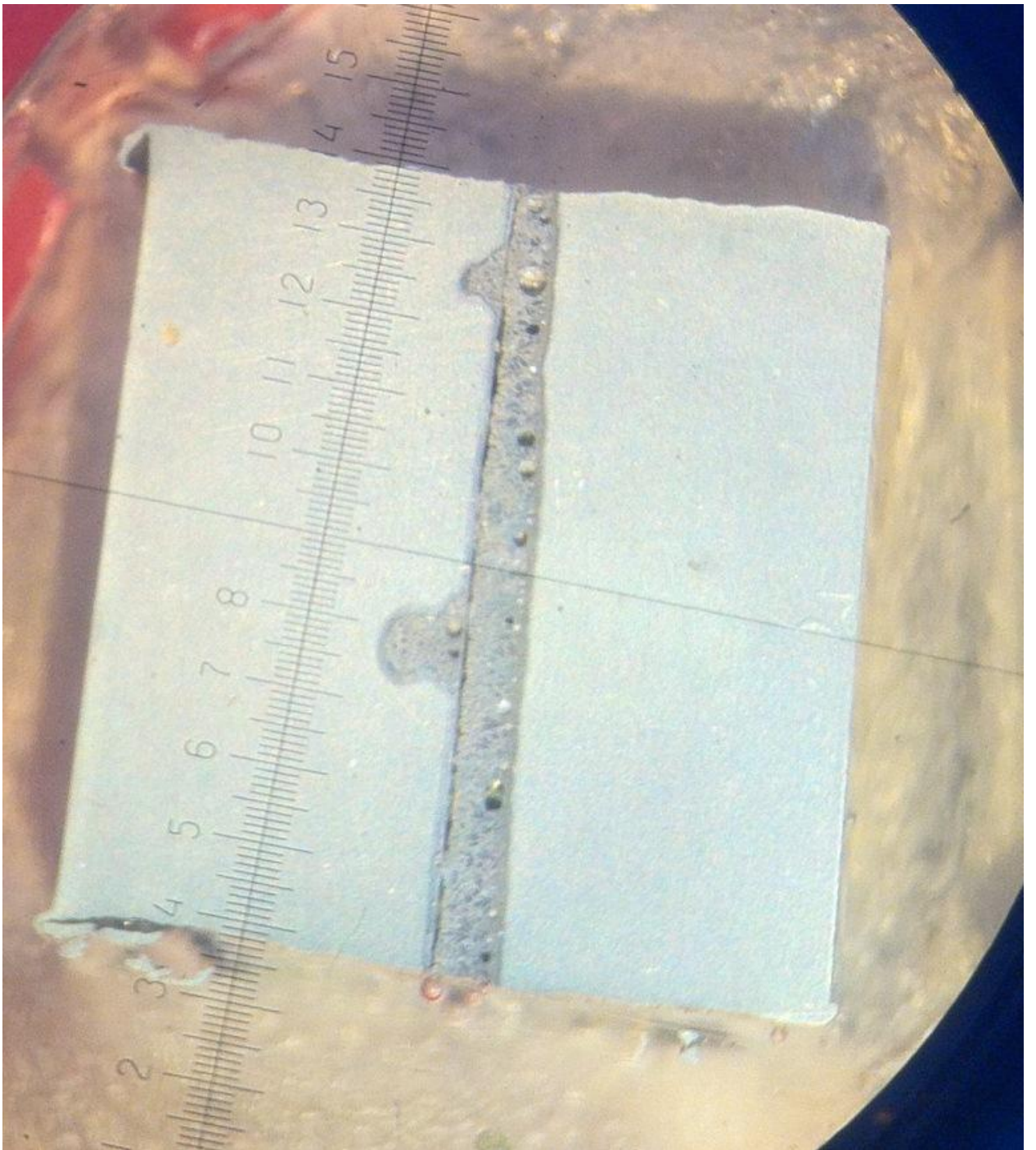


Рисунок 38 - Шлиф алюминиевого образца с припоем системы Al-Zn

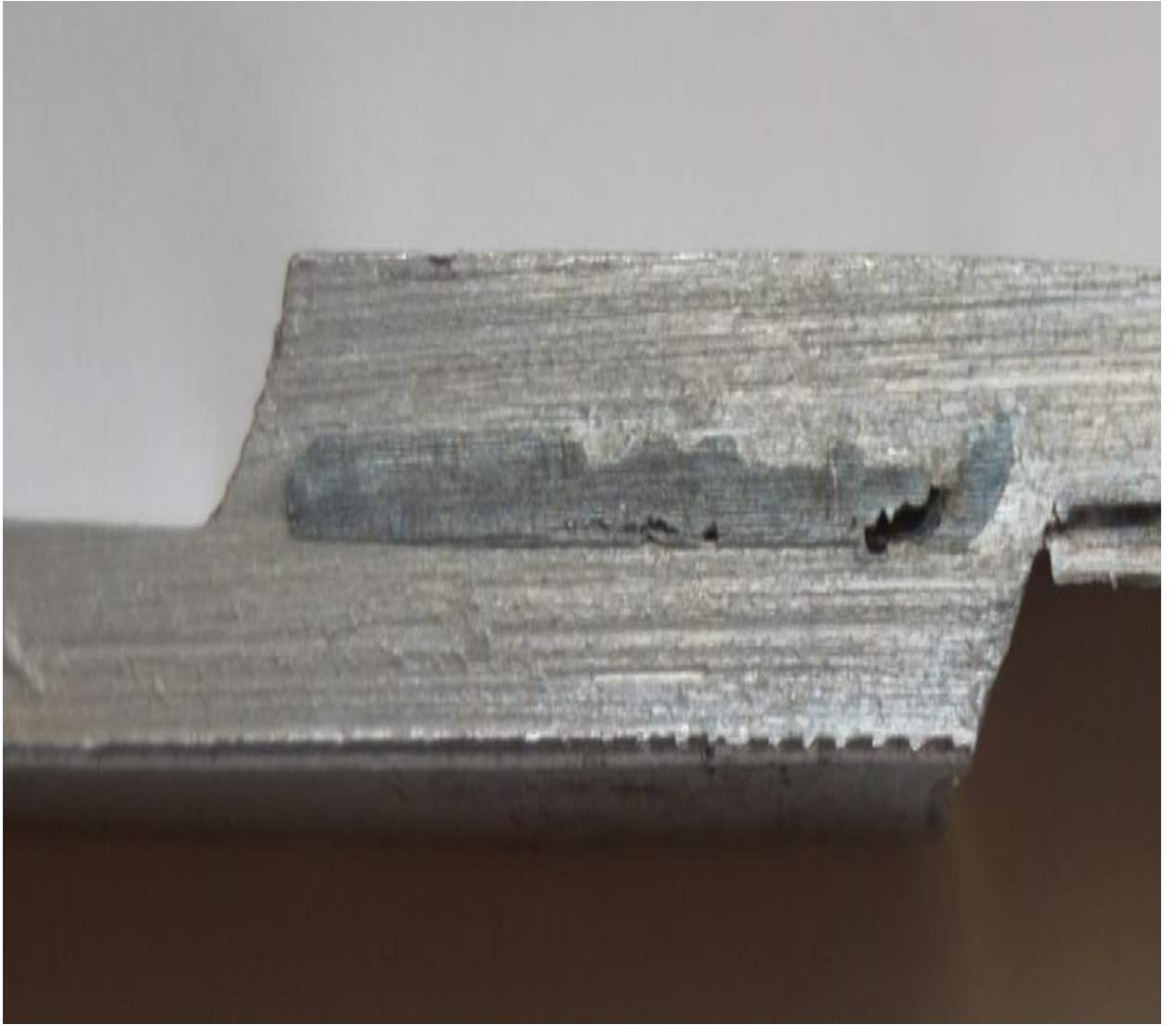


Рисунок 39 - паяный образец в нахлест припоем системы Al-Zn

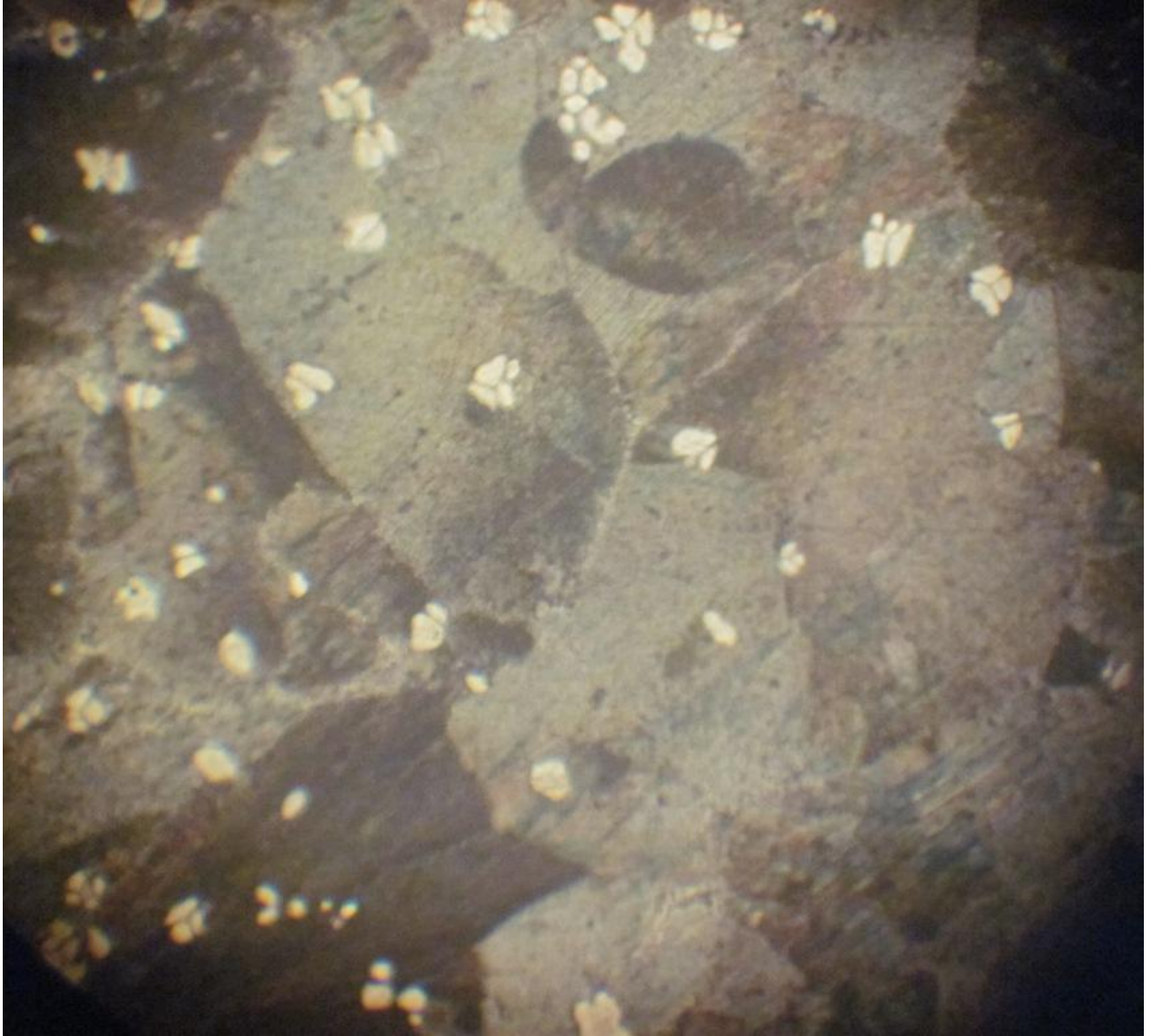


Рисунок 40– Микроструктура алюминиевого образца системы Al-Zn
Данная микроструктура была получена при температуре 430°C.

При проведении механических испытаний получили значения максимального значения сопротивления σ_b в МПа в зависимости от температуры пайки, рисунок 32.

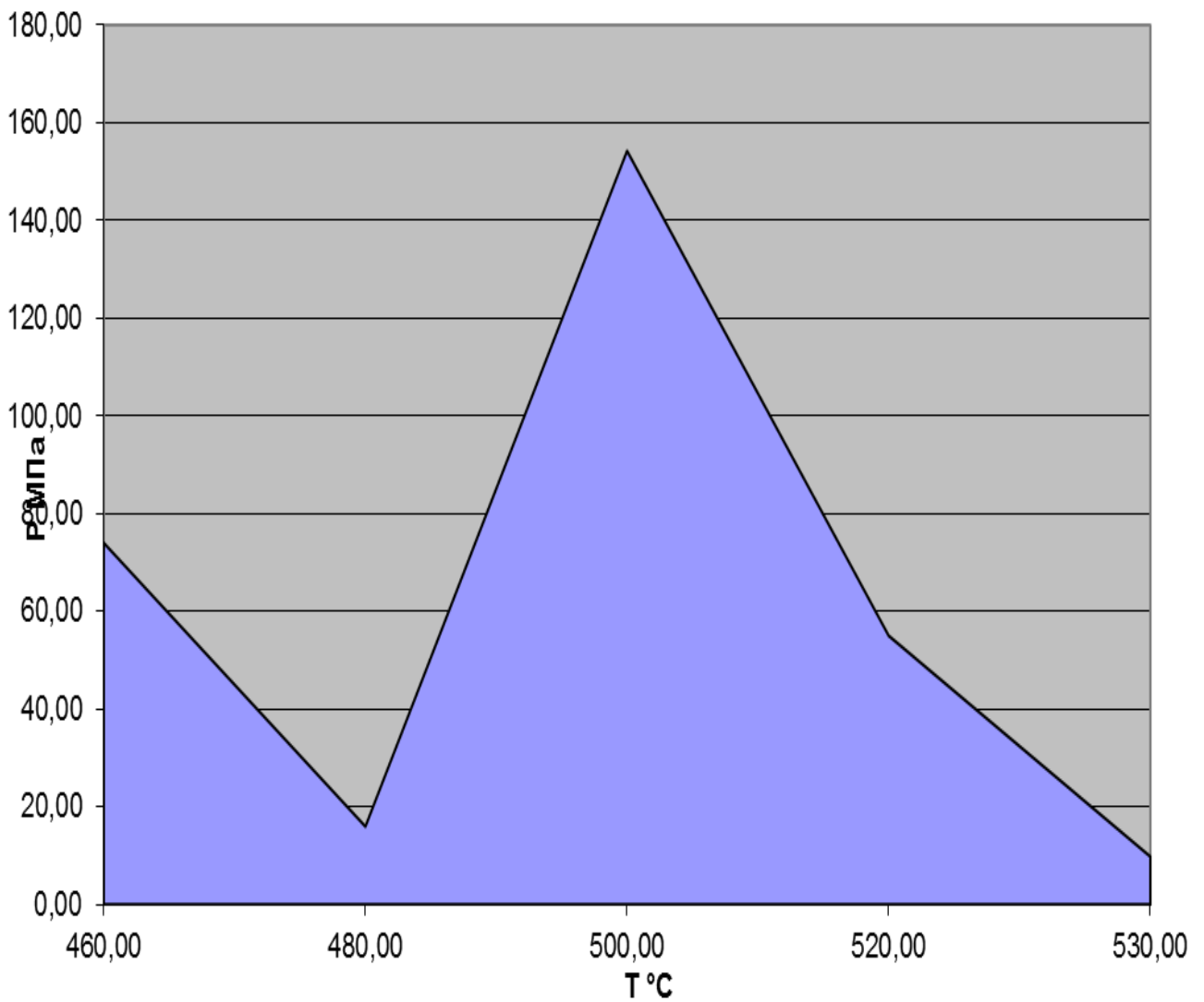


Рисунок 41 – Диаграмма зависимости показания Р Мпа от температуры.

Для дальнейшего исследования измеряли микротвердость.

Определение твердости методом вдавливания является простым и распространенным видом механических испытаний металлов. Данный метод заключается в том, что в испытываемый материал под действием вдавливателя в форме пирамиды, металлического шара или острого конуса, рисунок 42.



Рисунок 42- Испытания на твердость вдавливанием

Испытание на твердость имеет преимущества: не требуется изготовление специальных образцов для испытания; размеры отпечатка малого размера, поэтому не деформируются поверхность детали, замеры твердости можно на рабочих частях изделий.

При испытании на твердость деформируется объем материала. Значение деформируемого объема зависит от значения прикладываемой нагрузки, чем меньше величина нагрузки, тем более точные выявляются значения распределения свойств металла.

«В зависимости от значения величины нагрузки разделяют:

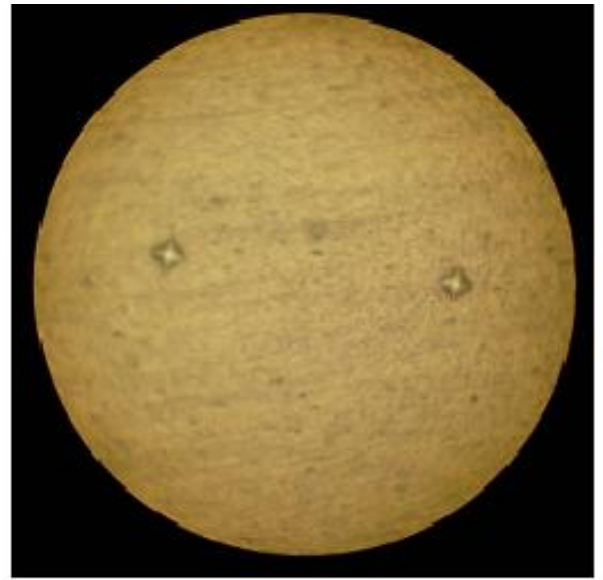
- макротвердость, определяемую в диапазоне нагрузок свыше 49 Н (5 кГ), и

-микротвердость, определяемую в диапазоне нагрузок от 0,049 Н (5 Г) до 4,9 Н (500 Г). Между этими нагрузками существует промежуточный диапазон — используется твердость при небольших нагрузках, неиспользуемая ныне. При проведении испытания на значение макротвердости деформируемый объем металла имеет большее количество отдельных структурных составляющих металла, поэтому этим методом пользуются для получения средней твердости металла.

При испытании назначение микротвердости размер отпечатка имеет малый размер, поэтому возможно определять твердость зерен отдельных и структур металла. Способ определения микротвердости-важный метод анализа физических и химических свойств.»[13]

На Рисунке 33 показан алюминий до и после нагрева, при нагрузке 43 грамм, после нагрева твердость алюминия увеличилась, но не значительно.

На Рисунке 34 показан отдельно сплав Al-Zn и цинковая заготовка, при нагрузке 20 грамм. В сплаве Al-Zn имеются включения, твердость которых значительно больше твердости основного материала.



Алюминий до нагрева Алюминий после нагрева

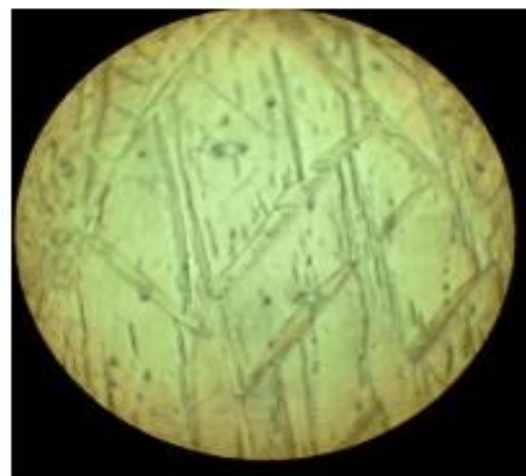
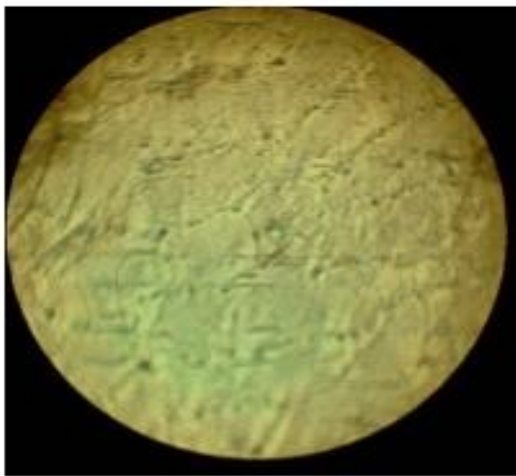
$P = 20 \text{ г};$

$H_{\mu} = 40,94 \pm 1,31$

$P = 20 \text{ г};$

$H_{\mu} = 49,67 \pm 1,92$

Рисунок 43 Алюминий до и после нагрева



*Цинковая заготовка
до нагрева*

$P = 20 \text{ г};$

$H_{\mu} = 55,07 \pm 13,19$

*Сплав Zn-Al
после нагрева*

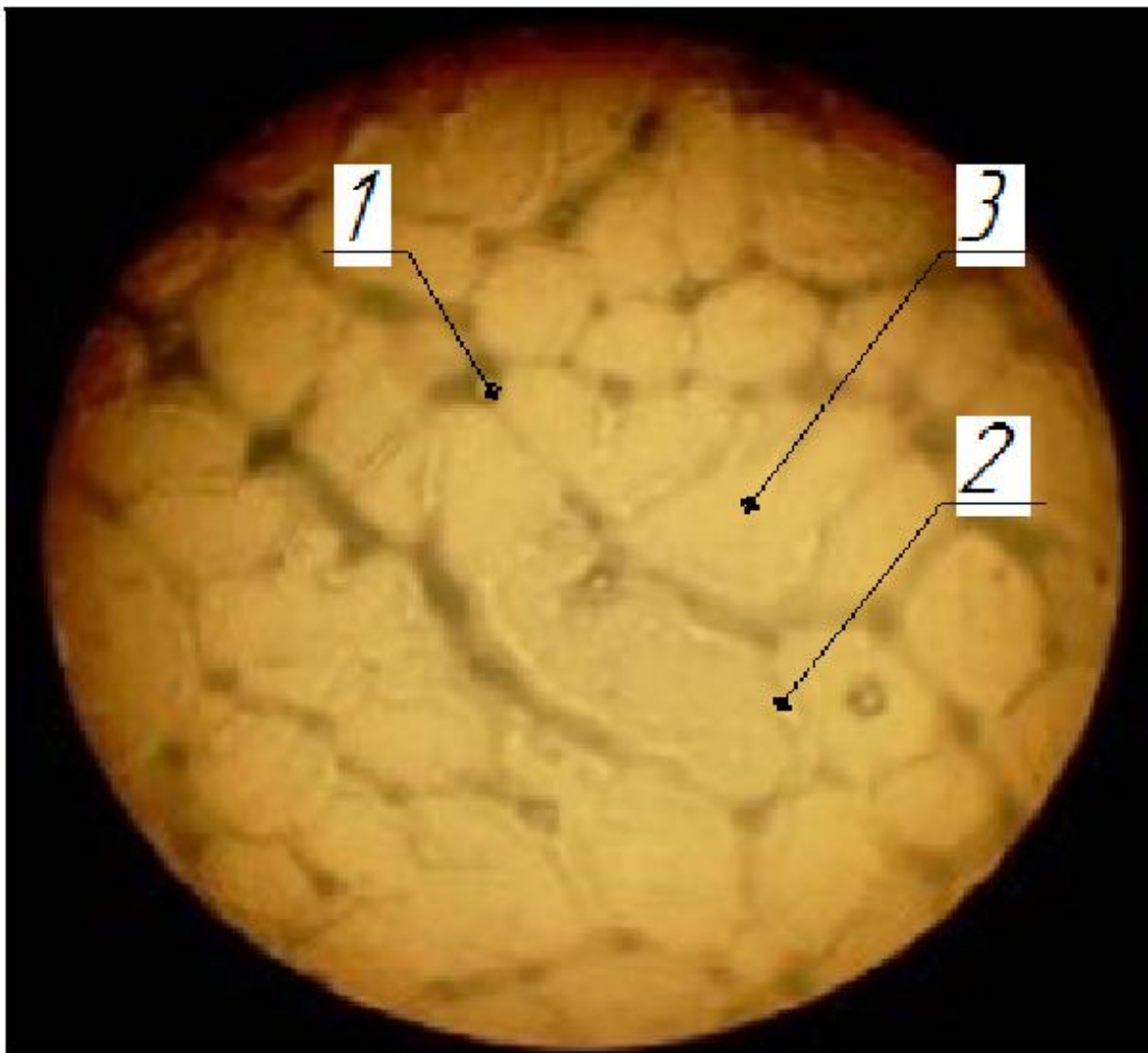
$P = 20 \text{ г};$

$H_{\mu} \text{ осн.} = 114,4$

$H_{\mu} \text{ вкл.} = 405,2$

Рисунок 44 Цинк до нагрева и цинк в сплаве Al-Zn

Микроструктура паяного шва представлена на Рисунке 45. Твердость паяного шва имеет показания почти равные значениям твердости алюминия до пайки.



H_{μ} – микротвердость;

P – нагрузка, г.;

1 – темные включения в матрице, $H_{\mu} = 152,8$

2 – светлые включения в матрице, $H_{\mu} = 405,2$;

3 – матрица, $H_{\mu} = 114,4$

Рисунок 45 – Паяный шов образца, $H_{\mu} = 40,42 \pm 1,1$.

Так же были проведены опыты при других способах пайки, для сравнения предела прочности. Сравнивались следующие способы пайки:

- автовакуумная пайка; $S_{\phi} = 35 \text{ мм}^2$; $\sigma_{\phi} = 3,31 \text{ кгс} / \text{мм}^2$

- пайка в печи, без герметизации; $S_{\phi} = 129,51 \text{ мм}^2$; $\sigma_{\phi} = 0,6 \text{ кгс} / \text{мм}^2$

- пайка электросопротивлением. $S_{\phi} = 35,51 \text{ мм}^2$; $\sigma_{\phi} = 2,98 \text{ кгс} / \text{мм}^2$

Измерив фактические площади образцов и рассчитав предел прочности, стало ясно что наибольший предел прочности имеет образец выполненный автовакуумной пайкой.

Заключение

Проведено исследование расширения возможности бесфлюсовой пайки алюминия и сплавов на основе алюминия. При автовакуумном способе пайки происходит контактно-реактивное плавление цинка на поверхности алюминия. При проведении серии опытов получили результат, что качество полученных паяных соединений зависит от подготовки поверхности алюминия и цинка под пайку и герметичности сварного шва. Так же немаловажную роль играет выбор режима нагрева и времени выдержки, так как при быстром нагреве и малой выдержке припой не успевает разрушить оксидную пленку на поверхности алюминия, если использовать долгий нагрев и выдержку, то цинка растворяется в алюминии или через менее прочное место проплавляет алюминий на полную толщину пластины.

Использование способа автовакуумной пайки при пайке алюминия обеспечивает:

- возможность изготовления крупногабаритной конструкции с некапиллярными зазорами;
- возможность проводить пайку с помощью печного нагрева;
- исключение использования флюса для разрушения оксидной пленки алюминия.

В процессе работы был изучен процесс автовакуумной бесфлюсовой пайки, полученные результаты экспериментов показали, что данный способ обладает рядом преимуществ: получение качественного паяного соединения с элементами контактно-реактивного плавления в зоне пайки. В процессе исследовательской работы был создан атлас микро- макро- структур для анализа структур сплавов в зоне паяного шва при автовакуумной пайке алюминия цинковым припоем. Выявлено влияние термического цикла пайки на структуру и химический состав сплавов полученных в паяном шве. При равномерном нагреве и нормальной выдержке получается равномерный

паяный шов с элементами проплавления цинком алюминия. При малой выдержке при температуре пайки, припой не успевает растечься и растворить оксидную пленку, поэтому видно несплошность паяного шва и не пропай. При длительной выдержке припой на основе цинка растворяется в основном алюминии и проплавляет его в местах с меньшей степенью сопротивления, то есть объем припоя требуемый для заполнения объема зазора концентрируется в одном месте – результат не пропай, выход расплава через основной металл или через слабое место герметизирующего сварного шва. Способ бесфлюсовой автовакуумной пайки возможно применять при изготовлении колес компрессоров, корпусов реакторов, корпусов цистерн требующих высокую коррозионную стойкость. Данный способ удобен тем, что изготовленные слоистые конструкции не имеет в промежуточном слое пустоту – что увеличивает прочность и как следствие срок службы узла.

Оборудование для процесса автовакуумной пайки имеет преимущества связанные с достаточно не высокой стоимостью, не требуется высокая квалификация персонала, что позволит сэкономить средства, подготовка материалов не трудоемкая. Все эти перечисленные факторы снижают себестоимость конечного изделия. Исходя из выше описанного цель работы достигнута.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов, В.И. Чистые и сверхчистые металлы/ В.И. Иванов [и д.р.]. - М.: Металлургия. 1965. - 263 с.
2. Петрунин, И.Е. Справочник по пайке / И.Е. Петрунин. – М.: Машиностроение, 2003. - 481 с.
3. Металловедение: учебник для вузов/ А.Л. Гуляев, 6-е издание, переработанное и дополненное – М.: Металлургия, 1987. – 546 с.
4. Кубашевский, О. Окисление металлов и сплавов/ О. Кубашевский, Б. Гопкинс.– М.: Металлургия, 1965. – 428 с.
5. Стенейберг, М.А. Тугоплавкие металлические материалы для космической отрасли/ М.А. Стенейберг. – М.: Мир, 1996. – 422 с.
6. Колачѐв, Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов/ Б.А. Колачѐв [и д.р.]. - М.: Металлургия, 1973. -482 с.
7. Есенберлин, Р.Л. Пайка и термическая обработка деталей в газовой среде и вакууме/ Р.Л. Есенберлин. – Л.: Машиностроение, 1973. - 186 с.
8. Патон, Б.Е. О растворении газов воздуха в твердом металле в процессе самопроизвольной очистки его поверхности / Б.Е. Патон [и д.р.]. - Д.А.Н. – 1968. – Т. 181. – №1 – С. 76.
9. Патон, Б.Е. Самопроизвольная очистка металла от окисных плѐнок / Б.Е. Патон [и д.р.]. - Д.А.Н. – 1964. – Т.159. – №1. – С. 72-73.
10. Лашко, С.В. Пайка металлов/ Лашко С.В., Н.Ф. Лашко. Изд. 4-е., – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
11. Петрунин, И.Е. Справочник по пайке / И.Е. Петрунин. – М.: Машиностроение, 1984. – 400 с.
12. Краснопевцев, А.Ю. Припои, образующиеся в процессе пайки / А.Ю. Краснопевцев .Сварочное производство. – 2010. – №12. – С. 15–18.

13. Петрунин, И.Е. Металловедение пайки./ И.Е. Петрунин [и д.р.]. – М.: Металлургия, 1976. – 264 с.
14. Краснопецев, А.Ю. Исследование структуры и свойств сплавов системы Al-Zn/ А.Ю. Краснопецев [и д.р.]- Т. : ТГУ, 2013. - 343 с.
15. Элиот, Р.Д. Структуры двойных сплавов./ Р.Д. Элиот. – М.: Металлургия, 1970. – 472 с.
16. Хряпин, В.Е. Справочник паяльщика./ В.Е. Хряпин. – М.: Машиностроение, 1981. – 349 с.
17. Крафт, В.Е. Пайка разнородных металлов с деформированием соединяемых элементов./ В.Е. Крафт//Сварочное производство. – 1980. – №10. – С. 22-23.
18. Калинин, Б.Б. Аморфные ленточные припои для высокотемпературной пайки./ Б.Б. Калинин [и д.р.]// Сварочное производство. – 1998. – №1. – С. 15-18.
19. Плюшев, А.Н. Разработка быстрозакаленных аморфных и микрокристаллических сплавов для высокотемпературной пайки материалов атомной техники./ А.Н. Плюшев – Дис. канд. техн. наук : 01.04.07. – М., 2003.
20. Сальников, В.Н., Новые плакированные алюминиевые сплавы для пайки в вакууме./ В.Н. Сальников [и д.р.]// Пайка в машиностроении: тезисы докладов ВНТК. – Т: ТолПИ, 1991. – С. 53-56.
21. Суслов, А.Я. Пайка термоупрочняемых алюминиевых сплавов./ А.Я. Суслов, А.Н. Строганов.// Пайка в машиностроении: тезисы докладов ВНТК. – Т: ТолПИ, 1991. – С. 121-125.
22. Никитин, С.Л. Некоторые вопросы создания литейных композиционных материалов./ С.Л. Никитин // Сб. ст. «Новые материалы и технологии», – М.: изд. ЛАТМЭС, 1996.
23. ГОСТ 1583-93 Сплавы алюминиевые литейные./ ГОСТ 1583-93 – М.: Издательство стандартов. – 1993.

24. Никитин, А.М. Пайка алюминия и его сплавов./ А.М. Никитин. - М.: Машиностроение, 1983. – 190 с.
25. Жуховицкий, А.А. Физическая химия./ А.А. Жуховицкий, Л.Я. Шварцман. – М.: Металлургия, 1976. – 543 с.
26. Хансейн, М. Структуры двойных сплавов./ М.Хансейн, К. Андерко; Пер. с англ. П. К.Новика и др.; Под ред. И. И. Новикова, И.Л. Рогельберган. – 2-е изд., перераб. – М.: Металлургиздат, 1962. – Т. 1. – 1962. – 608 с.
27. Гржимальский Л.Л., Ильевский И.И. Технология и оборудование пайки. – М.: Машиностроение, 1979. – 240 с.
28. Сторчайк, Е.И. Новая экологически чистая технология пайки крупногабаритных алюминиевых пластинчато-ребристых теплообменников/ Е.И. Сторчайк [и др.]. // Сб. ст. Пайка в создании изделий современной техники. – М.: Знание, 1995.
29. Хорунов, В.Ф. Пайка алюминия с использованием реактивного флюса/ В.Ф. Хорунов, Сабдаш О.М. // Сб. трудов международной научно-технической конференции «Пайка-2005». – Тольятти: ТГУ, 2005 – С. 172-175.
30. Пузрин, Л.Г. Высокотемпературная печная флюсовая пайка./ Л.Г. Пузрин, Шляхтич И.Л. // Прогрессивные методы в пайке. – Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1986. – С. 44-48.
31. Рымарь, В.И. Высокотемпературная автовакуумная пайка с использованием сорбентов./ В.И. Рымарь, Радзиевский В.Н. // Сварочное производство. – 1978. – №2. – С. 12-14.
32. Смирнов, Г.М. Прогрессивные способы пайки алюминия./ Г.М. Смирнов – М.: Металлургия, 1981. – 240 с.
33. Лебедев, Ю.Л. Бесфлюсовая пайка в замкнутой воздушной среде./ Ю.Л. Лебедев.// Прогрессивные способы сварки, новые материалы и конструкции в сварочном производстве. – И: Удмуртия, 1973. – С. 60-61.
34. Перевезенцев, Б.Н. Активирование поверхности при вакуумной пайке

- алюминия./ Б.Н. Перевезенцев [и д.р.]. // Сварочное производство. – 1996. – №2. – С. 19-20.
35. Суслов, А.Л. Высокотемпературная бесфлюсовая пайка алюминиевых сплавов в вакууме./ А.Л. Суслов. – Тр. ВНИИНмаш, 1975, – вып.21.
36. Перевезенцев, Б.Н. Пайка алюминия в низком вакууме./Б.Н. Перевезенцев [и д.р.]. // Сварочное производство. – 1996. – № 6. – С. 15-17.
37. Радзиевский, В.Н. Автовакуумная пайка с нагнетанием припоя в некапиллярный зазор./ В.Н. Радзиевский, В.И. Рымарь // Надежность и качество паяных соединений: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Саратов, сент. 1982 – Ч.2. – С. 130-132.
38. Григорьев, Г.А. О влиянии паров расплава на кинетику смачивания твёрдого металла./ Г.А. Григорьев [и д.р.]. // Изв.АН СССР. Металлы. – №3. – 1974. – С. 118-120.
39. Гельман, А.Р. О взаимодействии с газами в условиях автовакуумного нагрева при сварке./ А.Р. Гельман, М.С. Барышов // Сварочное производство. – 1971. – №5. – С. 9-11.
40. Рымарь, В.И. Взаимодействие Mn, Cr, и Ti с воздухом в условиях автовакуумного нагрева при пайке./ В.И. Рымарь // Сварочное производство. – 1973. – №11. – С. 6-8.
41. Россошинский, А.А. Вопросы образования паяного соединения./ А.А. Россошинский. // Припои для пайки современных материалов. – К.: ИЭС им. Е.О. Патона, 1985. – С. 3-13.
42. Дубинин, Г.М. Структурно-энергетическая гипотеза влияния диффузионного слоя на объёмные свойства сплавов./ Г.М. Дубинин. // Защитные покрытия на металлах. – 1976. – вып.10. – С. 90-96.
43. Фаст, Д.Л. Взаимодействие металлов с газами./ Д.Л. Фаст. Т.2. Кинетика и механизм реакций. Пер. с англ. – М.: «Металлургия», 1975. – 352 с.

44. Бретшнайдер, С. Свойства газов и жидкостей./ С. Бретшнайдер. – Л.: Химия, 1966. – 536 с.
45. Дэшманс, С. Научные основы вакуумной техники./ С. Дэшманс. – М.: Мир, 1964, – 715 с.
46. Перевезенцев, Б.Н. Пайка конструкций из алюминиевых сплавов с некапиллярными зазорами./ Б.Н. Перевезенцев [и д.р.]// Сварочное производство. – М.: 2002. – № 8. – С. 40-43.
47. Ивановский, М.М. Испарение и конденсация металлов./ М.М. Ивановский [и д.р.]. – М.: Атомиздат, 1976. – 216 с.
48. Федоров, Г.В. Влияние степени разрежения и состава остаточных газов в рабочей камере на давление пара металла и сплавов./ Г.В. Федоров.// Журн. физ. химии. – 1971. – Т. XV – №5 – С. 121.
49. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: «Химия», 1976. – 232 с.
50. Григорьев Г.А., Барков А.А., Березников Ю.И. Влияние паров металлов на механические свойства алюминиевых фольг // Физико-химическая механика материалов . – 1973. – Т.9. – №6. – С. 40-43.
51. Перевезенцев, Б.Н. Активирование поверхности алюминиевых сплавов при пайке в низком вакууме./ Б.Н. Перевезенцев [и д.р.]// Современные проблемы сварочной науки и техники: тезисы докладов международной научно-технической конференции 27-30 сентября, 1993 г. – Р.:, 1993. – С. 17-21с.
52. Ройх, И.Л. Нанесение защитных покрытий в вакууме./ И.Л. Ройх [и д.р.]. – М.: Машиностроение, 1976. – 367 с.
53. Захаров, А.М. Диаграммы состояния двойных и тройных систем./ А.М. Захаров. – М.: «Металлургия», 1978. – 296 с.
54. Яцимирский, В.К. Поверхностная активность компонентов в сплавах и их каталитические свойства./ В.К. Яцимирский, О.М. Вазьмитина. //

- Смачиваемость и поверхностные свойства расплавов твердых тел. – К.: «Наук. Думка», 1972. – С. 137-141.
55. Перевезенцев, Б.Н. Металлокерамическая пайка изделий из алюминия и его сплавов с увеличенными сборочными зазорами./ Б.Н. Перевезенцев [и д.р.]. // Межвузовский сборник научных трудов – Т.: ТолПИ, 1999. – С. 142-149.
 56. Конкевич, В.Ю. Композиционные припои для пайки алюминия./ В.Ю. Конкевич [и д.р.].// Тезисы докладов ВНТК "Пайка в машиностроении". – Т.: ТолПИ, 1991. – С. 47-52.
 57. Семенов, В.А. Пайка металлов в вакууме./ В.А. Семенов [и д.р.]. - Л.: ЛДНТП - 2015. - 164 с.
 58. Лашко, С. В. Пайка металлов./ С. В. Лашко, Н.Ф. Лашко. – М.: Машиностроение - М., 2015. - 376 с
 59. Прыкин, Б.В. Технология металлов и сварки./ Б.В. Прыкин. – К.: Вища шк., 1978. - 240 с.: ил.
 60. Лашко, С. В. Пайка металлов./ С. В. Лашко, Н.Ф. Лашко. — 4-е изд., перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1988.—376 с: ил.
 61. Лоцманов, С. Н. Руководство по пайке металлов./ С.Н. Лоцманов. - М.: Оборонгиз -1960.-191 с.
 62. Singleton, O.R. Aluminum vacuum brazing – materials and surfase effects./ Singleton O.R. P. McNamara // Aluminum (BRD). – 1974. – 50. №6. – P. 407-410.
 63. Takemoto, T. Vacuum brazing of aluminium / Takemoto T. // Keikinzoku – Japan Light metals welding. – 1986. – V36. N9. – P.548-554.
 64. Bosler, R. Containerloten in luft – ein wirtschaftliches schmelzlotverfahren fur die Regenerierung./ R. Bosler // Einzel-und kleinserienbertigung. – Schweibtechnik. – 1983. – №2. – S. 62-63.
 65. Schmatz, D.I. A fluxless process for brazing aluminum heat exchangers in inert gas./D.I. Schmatz. // Welding Journal. – 1983. – № 10(62). – P. 31-38.

66. Perevezentsev, B.N. Brazing structures of aluminium alloys with noncapillary gaps./ B.N. Perevezentsev // Welding International. – 2003. – №17(1).– P. 78-80.