

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

«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)/специализация)

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Исследование возможностей пайки и термической обработки магнитострикционных материалов»

Студент

Д.С. Ховришкин

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

Руководитель

А.Ю. Краснопевцев

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

Консультанты

А.Г. Егоров

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

\_\_\_\_\_ (И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

\_\_\_\_\_ (И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

**Руководитель**

**программы: к.т.н, доцент А.Ю. Краснопевцев**

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

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

**Допустить к защите**

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

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

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

Тольятти 2019

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Состояние вопроса.....	6
1.1 Ультразвуковая сварка пластмасс и ее особенности .....	6
1.2 Ультразвуковая сварка и общие характеристики процесса .....	8
1.3 Описание физической модели зоны сварки .....	11
1.4 Конструкция и характеристики ультразвукового оборудования .....	14
1.4.1 Технические характеристики ультразвукового оборудования	15
1.4.2 Описание конструкции ультразвукового оборудования .....	16
1.4.3 Комплекс для ультразвуковой сварки пластмасс .....	18
1.4.4 Магнитострикционный преобразователь .....	23
1.4.5 Свойства и особенности магнитострикционных материалов .	26
1.5 Особенности термической обработки прецизионных сплавов ..	31
1.5.1 Регламент ГОСТ 10160-75 .....	31
1.5.2 Монографический анализ .....	32
1.5.3 Анализ исследовательских работ и статей.....	36
1.6 Применяемый способ пайки .....	44
1.7 Задачи магистерской диссертации .....	47
2 Исследование возможности термообработки.....	49
2.1 Методика проведения экспериментального отжига .....	49
2.2 Экспериментальные данные опытов по термообработке .....	58
2.3 Анализ полученных результатов отжига.....	61
3 Исследование возможностей пайки и совмещения .....	71
3.1 Методика проведение экспериментальной пайки в печи .....	71
3.2 Экспериментальные данные опытов по пайке.....	76
3.3 Анализ полученных результатов пайки .....	79

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	83
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	85

## ВВЕДЕНИЕ

Сложно представить все отрасли и сферы где используют полимеры и различные пластмассы ведь их количество в современном мире всеобъемлюще. Так же как и железо во времена «Железного века», которое пришло на смену бронзе, полимеры и пластмасса приходят на смену железу, дереву, стеклу и прочим материалам там, где это представляется возможным, имеет смысл и экономическую выгоду.

Из чего следует рост производства и необходимость в оборудовании для технологических процессов связанных с использованием вышеупомянутых пластмасс и полимеров, а точнее оборудование для получения тех или иных изделий из них.

Например, одним из методов обработки полимеров является ультразвуковая сварка. Благодаря такому виду сварки представляется возможным получить соединение без инородных материалов, то есть обойтись без болтов, клея или заклёпок. Такую сварку используют тогда, когда необходимы изделия повышенной надёжности и герметичности.

Так же стоит отметить, что технология ультразвуковой сварки полимерных и термопластичных материалов со временем обретает более широкое применение при создании новейших видов изделий.

В связи с ростом спроса на рынке необходимо обеспечивать предложение одним из таких является технологический комплекс ультразвуковой сварки листовых пластмасс. Данный комплекс представляет собой малогабаритный ультразвуковой генератор с комплектом необходимых устройств, для мелкосерийного производства и изготавливается в Тольяттинском государственном университете. Одним из его важнейших компонентов является магнитострикционный преобразователь, который состоит из магнитострикционных пластин. Для данных пластин необходимо проводить отжиг с целью улучшения их магнитных и механических свойств.

Тема данной магистерской диссертации «Исследование возможностей пайки и термической обработки магнестрикционных материалов» является прямым продолжением бакалаврской работы на тему «Исследование и разработка технологии изготовления магнестрикционного преобразователя».

Обработка сплава типа пермендюр, в данной работе сплав 49К2ФА, обуславливается технологической сложностью связанной с оборудованием и режимами термообработки и пайки. Большие затраты времени на производство отжига и пайки представляется возможным сократить.

Цель данного исследования заключается в снижение себестоимости производства магнестрикционного преобразователя.

# **1 Состояние вопроса**

## **1.1 Ультразвуковая сварка пластмасс и ее особенности**

Из всего разнообразия видов и методов сварки для получения монолитных соединений пластмасс ультразвуковая сварка выделяется на фоне конкурирующих способов благодаря ряду ценных технологических свойств. К таким свойствам можно отнести сварку материалов различных толщин, то есть разнотолщинных материалов или же вовсе сварку разнородных по составу материалов, так же в зависимости от особенностей технологического процесса имеется возможность производить пайку без снятия оксидной плёнки. Таким образом, ультразвуковая сварка по праву занимает свою нишу [1].

Область ультразвуковой сварки термопластичных полимеров за последнее время становится шире, и использование данного метода распространяется в промышленности [1].

Без применения ультразвука развитие некоторых технологий сварки попросту было бы невозможным, например, сварка широко известных полимеров, как полистирол, полиметилметакрилат, полиэтилентерефталатные плёнки и тому подобные. Рациональность со стороны технико-экономического использования ультразвуковой энергии не вызывает сомнений [1].

Так же для справедливости стоит отметить, что после модификаций технологического оборудования для ультразвуковой сварки представляется возможным проводить такие технологические операции как развальцовка заклёпок при соединении пластмассы и металла, резка полимеров, финальная обработка материалов и другие операции [1].

При использовании ультразвуковой сварки отпадает необходимость в таком технологическом приеме как введения в зону сварки инородных материалов. Так же стоит отметить, что в зоне сварки образуется надмолекулярная структура сродни структуре исходного материала, из этого

следует, что сварное соединение максимально приближено исходному материалу. А это говорит о том, что механические свойства, а так же различные характеристики присущие исходному материалу будут и присуще сварному соединению, что свидетельствует о качестве монолитности.

Таким образом, в ряде случаев, когда к сварочному соединению в конструкциях предъявляются высокие требования в отношении прочности, герметичности и других свойств, сборку конструкций предпочтительно производить с использованием сварки [2].

Суть процесса ультразвуковой сварки термопластов состоит в том, что соединение образуется благодаря контакту соединяемых поверхностей активированных нагревом. Методику выполнения операций по сварке можно охарактеризовать большим разнообразием проведения данного процесса.

1. Обеспечить контакт поверхностей, после чего провести активацию
2. Провести активацию, а затем только контакт поверхностей
3. Провести контакт и активацию одновременно

То есть можно производить активацию соединяемых поверхностей в любом порядке в зависимости от технологического процесса. [2].

Введение энергии, которая необходима для активации свариваемых поверхностей, а так же необходимое давление усилия нужное для контактирования возможно проводить одними и теми же, либо различными инструментами [2].

Сварка термопластов, так же как и сварка металлов сопровождается рядом характерных для сварки в целом процессов, что происходят в зоне сварки: энергия необходимая для активации поверхностей преобразуется, при контакте свариваемых изделий происходит взаимодействие активированных поверхностей. Ну и конечно же такой процесс как образование сварного шва с образованием структуры схожей со структурой свариваемых изделий [2].

Процесс активации поверхностей сопряжён с контактированием данных поверхностей с теплоносителем. В качестве теплоносителей могут выступать: нагретые инструменты, различные газы или же присадочный материал. «А также за счёт поглощения и преобразование энергии высокочастотных электрических колебаний, лучистой энергии, механической энергии трения либо энергии высокочастотных механических колебаний» [2, с. 5].

Наиболее ответственными процессами являются процессы, связанные с контактированием активированных поверхностей, так как в этот момент происходит взаимодействие между макромолекулами полимера и от того как всё пройдёт, будут зависеть свойства полученного сварного соединения [2].

Во время формирования сварных соединений происходит образование надмолекулярной структуры в зоне контактирования. Надмолекулярная структура в большей степени определяет физико-механические и другие свойства материала. Таким образом, чтобы получить свойства сварного шва предельно приближенным к исходному материалу, требуется сформировать в шве надмолекулярные структуры, характерные для целого материала. Тип и характер надмолекулярных структур обуславливается свойствами полимерных молекул и условиями, в которых происходит образование структур [2].

## **1.2 Ультразвуковая сварка и общие характеристики процесса**

Ультразвуковая сварка металлов и полимеров основывается на применении энергии механических колебаний сварочного наконечника как одного из важных элементов. Ультразвуковая частота колебаний составляет более 16кГц, а амплитуда колебаний придерживается уровня 0,5-50 мкм. Благодаря сварочному усилию энергия вводится в зону сварки, пределы значений усилия находятся в районе (0,1÷1,0) от предела текучести свариваемых материалов [1,2].



Получение сварного соединения сопряжено с многочисленными сложными взаимодействиями разнородных факторов.

«С одной стороны, это комплекс явлений, связанный с интенсивными процессами внешнего трения, повышения температуры в свариваемых материалах, растрескиванием твердых и выгоранием жировых плёнок, повышением пластичности, обмятием макро- и микронеровностей, сближением контактирующих поверхностей на расстояние, близкое к межатомному и тому подобные явления. С другой стороны – это комплекс явлений, связанных с состоянием, способностью энергетического тракта подать эту энергию в зону сварки» [1, с. 5].

Главными образующими энергетике процесса ультразвуковой сварки являются такие процессы как внешнее и внутреннее трения.носителем энергии выступает внешнее трение, которое рассматривается как положительное явления, так как без данного явления процесс ультразвуковой сварки был бы практически невозможен [1].

В различных литературных источниках некоторые авторы указывают на однотипность процессов ультразвуковой, холодной и сварки трением. Если не брать в расчет схемы подачи энергии, так как их принцип широко известен. Проведём сравнительный анализ главных параметров режимов сварки. Такими параметрами выступают: общий путь движения, линейная скорость, амплитуды колебаний сварочного наконечника, частоты колебаний, точки свариваемой детали, сварочные давления и соответственно температуры в зоне сварки. Таким образом, имеется достаточное количество показателей, благодаря которым возможно объективно сравнить динамику передачи энергии в зону сварки. Все данные по вышеперечисленным параметрам представлены в таблице 1.1. Исходя, из сравнения показателей можно сделать вывод о том, что разговоры об однородности заканчиваются на первом приближении [1].

Так как результаты сравнения достаточно наглядно демонстрируют различия методов и не дают повода для дальнейшего сравнительного анализа, возвращение к этой теме в данной работе больше не имеет необходимости. Таким образом, тему сравнений методов сварки можно закончить на анализе таблицы 1.1 и перейти к более важным аспектам, которые напрямую связаны с технологией ультразвуковой сварки. Краткие сравнительные описания будут приведены ниже.

Таблица 1.1 – Сравнение параметров режимов сварки

Параметры	Вид сварки		
	Ультразвуковая	Холодная	Трением
Амплитуда, м	$6 \times 10^{-6}$	0,02	-
Частота, Гц	$16 \times 10^4 - 1,2 \times 10^6$	1	500-1500
Скорость, м/с	3 для металлов; 8 для полимеров	0,02	1,5
Путь, м	10 (реверсивный)	0,02	90
Давление, МПа	Меньше или равное пределу текучести для металлов; (0,1÷0,2) предела текучести для полимеров	120-150	30-50
Температура, Т	$0,4T_{пл}$	$0,3T_{пл}$	$0,8 T_{пл}$

Сравнительные данные по видам сварки после рассмотрения дают понять, что совпадений среди приведенных показателей не имеется. Частота и амплитуда колебаний, а так же способ контактирования сварки трением значительно разниться и не имеет точек соприкосновений с ультразвуковой сваркой ни по одному параметру.

«Разрыв возникающих межмолекулярных связей при сварке трением и соответствующее смещение точек достигает более  $1 \times 10^6$  мкм, в то время как при ультразвуковой сварке она может составить не более 10 мкм. Холодная сварка тем более ни по одному из признаков не похожа на ультразвуковую сварку» [1, с. 6].

Ультразвук сам по себе является специфическим видом энергии, а его потенциальность в реализации исключительно ценных технологических свойств позволяет, данному способу быть востребованным по сей день. Хорошая свариваемость больших групп термопластичных полимеров тому доказательство.

Также стоит отметить, что ряд термопластов, например лавсан или тот же полистирол преимущественно сваривают ультразвуковой сваркой [1].

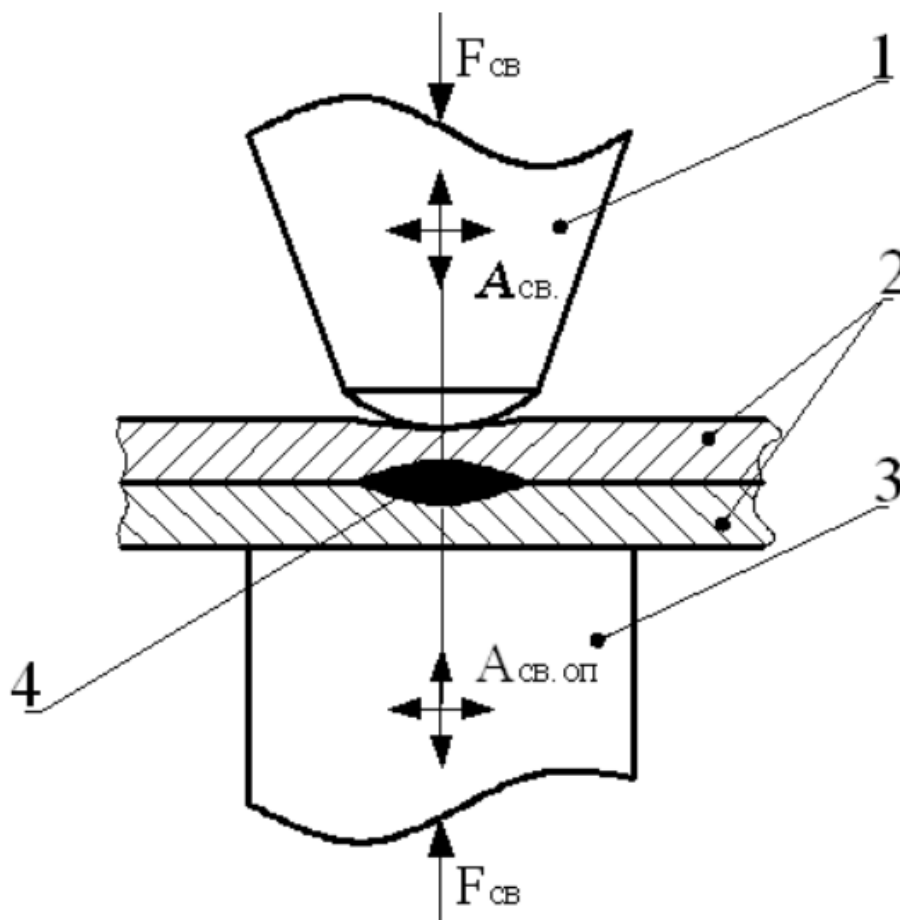
Раз тема актуальности и небольшого освящения завершена, является возможным подытожить, что данный вид сварки имеет и находит новые области применения, также имеется вектор для дальнейшего развития этой технологии. А внедрение подобных технологий несут за собой технико-экономическую эффективность и исключение вредных условий труда, а также несёт в себе реальное снижение трудозатрат на производстве [1].

### **1.3 Описание физической модели зоны сварки**

В ультразвуковой сварке сварочный наконечник играет роль источника колебаний, происходит это благодаря выполнению движений с указанной колебательной скоростью и предопределённой силой наконечника. Довольно непростой спектр колебательных напряжений является причиной возникновения сварочного усилия, а оно в свою очередь распределяется по волноводу. Таким образом, вследствие напряжений и колебательных скоростей образовывается мощность колебаний сварочного наконечника. На рисунке 1.1 приведена физическая модель зоны сварки [1].

Процесс внешнего трения двух твёрдых тел имеет основные энергетические составляющие, такие как:

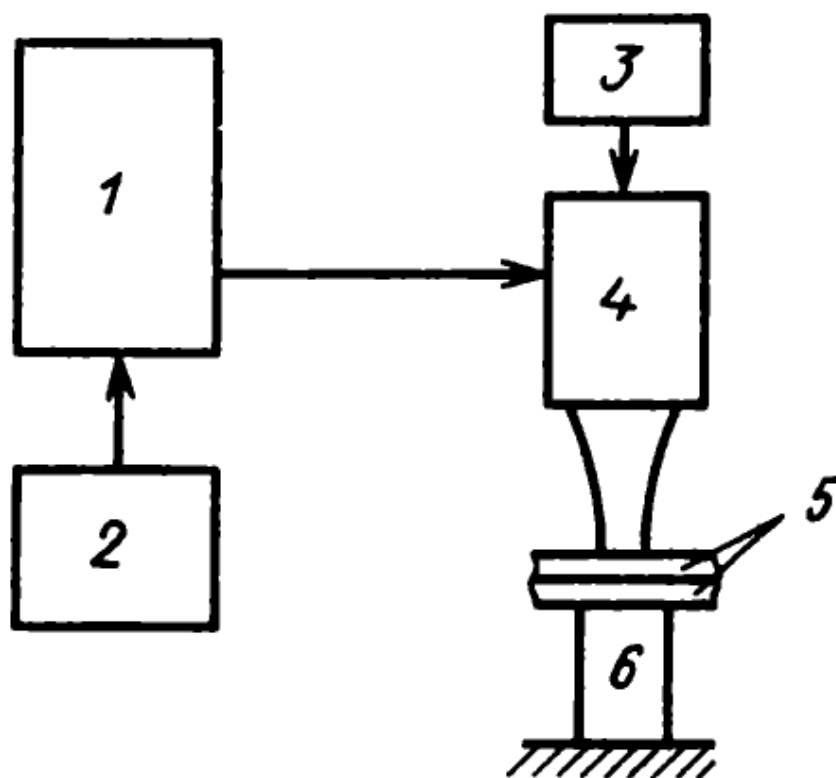
1. Энергия необходимая для упругопластического деформирования зон контактирования, также эта энергия идёт на преодоление механического сопротивления зон зацепления.
2. Энергия необходимая для активации поверхностных слоёв зон контактирования
3. Энергия необходимая для преодоления адгезионного сцепления
4. Энергия, необходимая для разрушения зон схватывания при появлении металлических связей
5. Энергия, затрачиваемая на потери на внутреннее трение



1 – Волновод, передающий энергию в зону сварки; 2 – Свариваемые детали; 3 – акустическая опора; 4 – зона сварки

Рисунок 1.1 – Физическая модель зоны сварки

«Ультразвуковая сварка обладает знакопеременным характером внешнего трения, а значит, возникают плоские волны, которые проходят через зону соприкосновения сварочного наконечника и возбуждают колебания смежной плоскости. При ультразвуковой сварке каждый последующий слой материала, по которому проходят колебания, а тем более фиксированные границы раздела, можно рассматривать как очередные звенья в общей цепи передачи энергии в зону сварки. Чем выше интенсивность внешнего трения при прочих равных условиях, тем больше энергии поступает в зону сварки, тем больше температура в зоне сварки и выше пластичность свариваемых материалов» [1, с. 8].



1 – ультразвуковой генератор; 2 – устройство включения и выключения ультразвуковых колебаний; 3 – механизм давления; 4 – сварочный узел; 5 – свариваемые изделия; 6 - опора

Рисунок 1.2 – Принципиальная схема ультразвуковой установки для сварки пластмасс

При ультразвуковой сварке такой процесс как внешнее трение принято считать полезным. Полезность трения заключается в положительном и отличительном качестве ультразвуковой сварки, а именно в возможности производить сварку тех или иных материалов без предварительного снятия оксидной плёнки, а так же данная черта позволяет производить пайку по малозагрязненным поверхностям. Если же слишком сильно ограничить внешне трение, то это приведет к снижению данного технологического преимущества. [1].

Так как формирование сварного соединения исключительно за счёт энергии внутренних потерь микро- и макродеформирования не представляется возможным, то внешнее трение играет важную роль в, дробление оксидных пленок, относительном перемещении свариваемых поверхностей, контактирование свежеччищенных участков и отвечает за общее повышение температуры в зоне сварки, передачу энергии ультразвука в смежную зону [1].

#### **1.4 Конструкция и характеристики ультразвукового оборудования**

Большинство ультразвуковых установок являются комплексом, в который входят ультразвуковые генераторы, роль которых заключается в преобразовании тока промышленных частот в ток высокой частоты. Так же в комплекс входят ультразвуковые преобразователи, чья роль заключается в преобразовании тока высокой частоты в механические колебания и заключительным элементом является технологическое устройство роль, которого заключается в непосредственном направлении механических колебаний на обрабатываемую поверхность или поверхности [3].

Ультразвуковые установки разбивают на группы по виду воздействия ультразвука на технологический объём:

1) Обработка объекта через промежуточную технологическую среду, являющегося передаточным звеном между источником воздействия и объектом воздействия

2) Воздействие оказывается непосредственно на объект, без применения промежуточной технологической среды

3) Так же имеет место комбинирование двух вышеизложенных схем

Ультразвуковые установки также можно разделять по типу технологических операций или же области использования, то есть ультразвуковая сварка, ультразвуковая очистка, различные механические обработки.

Представляется возможным классифицировать установки по типу применения:

1) Установки с индивидуальным исполнением

2) Установки, встраиваемые в поточные линии

Ну и последнее возможное разбиение на группы, которое основывается на технических возможностях установок их всего несколько, ультразвуковые установки универсальные и специализированные. Исходя из названия классификаций, можно понять, что одни работают с широким спектром номенклатуры, в то время как другие имеют более узкую направленность или же другими словами направленность на группу однотипных изделий [3].

#### 1.4.1 Технические характеристики ультразвукового оборудования

Ультразвуковые комплексы обладают электрическими и неэлектрическими характеристиками.

К электрическим относят:

1. Рабочая частота/диапазон частот

2. Мощность ультразвуковой частоты

3. Потребляемая мощность

4. Режим работы непрерывный/импульсивный

## 5. Уровень промышленных радиопомех

К неэлектрическим относят:

1. Производительность
2. Конструктивные особенности
3. Уровень шумов
4. Эксплуатационный показатель
5. Экономический показатель
6. Энергетический показатель

Логично предположить, что частота или диапазон частот напрямую зависят от назначения ультразвукового комплекса. Мощность ультразвуковой установки это электрическая мощность ультразвуковой частоты, подводимая к установке [3].

Потребляемая мощность установки представляется в виде суммы мощностей всех потребителей энергии с учётом потерь, то есть мощность, подводимая к установке. Режимы работы ультразвуковых установок определяются исходя из характера и вида технологической операции, а также характером и формой ультразвуковых колебаний. Уровень промышленных радиопомех должен находиться в допустимых пределах признанными общесоюзными нормами [3].

Конструктивные требования зависят от назначения установки и условий эксплуатации. В частных случаях представляется возможным предъявлять специальные конструктивные требования, которые определяются условиями содержания установки [3].

### 1.4.2 Описание конструкции ультразвукового оборудования

Ультразвуковые комплексы для сварки в независимости от физико-механических свойств, свариваемых материалов, имеет одну общую структуру, и состоят из следующих узлов:

1. Источник питания



2. Аппаратура управления сварочным циклом
3. Механическая колебательная система
4. Привод давления

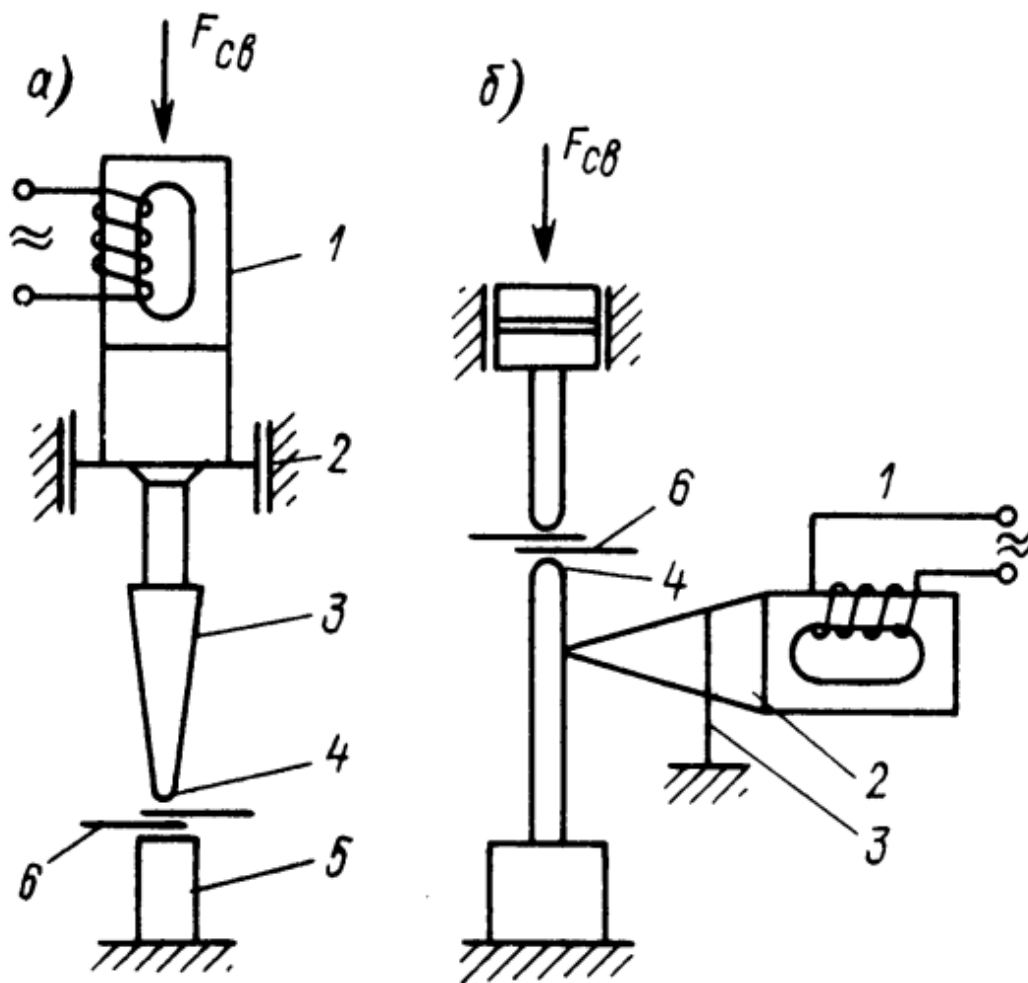
Основополагающим элементом данного оборудования является механическая колебательная система, так как именно колебательная система задаёт специфику оборудования и технологии [1].

Предназначение и роль колебательной системы заключается в преобразовании электрической энергии в механическую. Но это не единственная роль системы, передача полученной энергии в зону сварки также является работой колебательной системы. Независимо от изменений сопротивления нагрузки система соответственно должна работать с предельным коэффициентом полезного действия на резонансной частоте [1].

Электромеханические преобразователи 1 преимущественно изготавливаются из магнитострикционных материалов таких как: пермендюр, никель, титанат бария и других материалов, обладающих магнитострикцией. Из-за действия переменного электромагнитного поля на магнитострикционный преобразователь, в преобразователе появляются механические напряжения, которые в свою очередь вызывают упругие деформации материала. Следовательно, источником механических колебаний является магнитострикционный преобразователь [1].

Волноводное звено 2 предназначено для передачи энергии сварочному наконечнику. Данное звено обеспечивает надлежащие увеличение амплитуды колебаний сварочного наконечника по сравнению с амплитудой исходных волн преобразователя, трансформирует сопротивление нагрузки и концентрирует энергию [1].

Таким образом, рассматриваемая система интерпретируется как система с распределенными параметрами, а это означает, что данная система обладает бесконечным числом степеней свободы и собственных частот [1].



1 – преобразователь; 2- концентратор колебательной скорости; 3 – волноводное звено; 4 – сварочный наконечник; 5 – опора; 6 – свариваемые детали

а) Для сварки пластмасс

б) Для сварки металлов

Рисунок 1.3 – Типовые колебательные системы для сварки

#### 1.4.3 Комплекс для ультразвуковой сварки пластмасс

На рисунке 1.4 представлен технологический комплекс ультразвуковой сварки листовых пластмасс, разработанный и производимый в Тольяттинском государственном университете.



Рисунок 1.4 - Технологический комплекс ультразвуковой сварки

Данное оборудование представляет собой малогабаритный компактный ультразвуковой генератор с комплектом необходимых устройств, для мелкосерийного производства, для клепки и точечной сварки деталей различной конструкции.

Благодаря исследованиям процесса ультразвуковой сварки создан комплекс ручной точечной ультразвуковой сварки листовых пластмасс.

В комплекс входят такие элементы как:

- 1) Малогабаритный ультразвуковой генератор
- 2) Набор сменного сварочного инструмента
- 3) Устройство ручной точечной ультразвуковой сварки

Таблица 1.2 – Технические характеристики ультразвукового генератора

Наименование параметров и единиц измерения	Значение
Напряжение питающей сети, В	220
Частота сети, Гц	50
Потребляемая мощность, кВт	0,85
Мощность выходная, кВт	0,4
Рабочая частота, Гц	22
Габаритные размеры, мм	285×360×180
Масса, кг	8

Таблица 1.3 – Технические характеристики ультразвукового устройства

Наименование параметров и единиц измерения	Значение
Тип преобразователя	Магнитострикционный
Материал волновода	Титановый сплав ВТЗ-1
Амплитуда колебаний, мкм	10-40
Охлаждение воздушное, атм	2
Габаритные размеры, мм	Ø50×330
Масса, кг	0,95

Перечень свариваемых термопластов:

- 1) Полистирол
- 2) Полиметилметакрилат
- 3) Акрилонитрилбутадиенстирол
- 4) Непластифицированный поливинилхлорид
- 5) Полисульфон
- 6) Поликарбонат
- 7) Полиамид стеклонаполненный
- 8) Полиэтилен

## 9) Полипропилен

Таблица 1.4 – Режимы сварки

Наименование параметров и единиц измерения	Значение
Толщина свариваемых пластмасс, мм	1,5-4,5
Диаметр сварочной точки, мм	8-10
Сила прижима сварочного инструмента, кГс	0,5-2,5
Время сварки, с	1-5
Амплитуда колебания рабочего торца, мкм	50-70
Частота колебаний рабочего торца, Гц	22±0,5

На рисунке 1.5 показан процесс сварки и получаемые сварные точки.

Существует ультразвуковая сварка «близкого поля» и «дальнего поля». Суть этих разделений заключается в расстоянии между сварочным наконечником и местом проведения сварки. Если же говорить о цифрах, то при близком поле эта величина составляет не более 6 мм. Все остальные значения, превышающие 6мм, относятся к дальнему полю. Преимущественно стараются проводить сварку «близкого поля» там, где это невозможно производят сварку «дальнего поля».



Рисунок 1.5 – Сварка термопластов

Сварная точка имеет гладкую поверхность и форму шарообразной впадины и тороидального выступа как видно из рисунка 1.6. Подобная геометрия рабочей части волновода обеспечивает надёжное соединение.

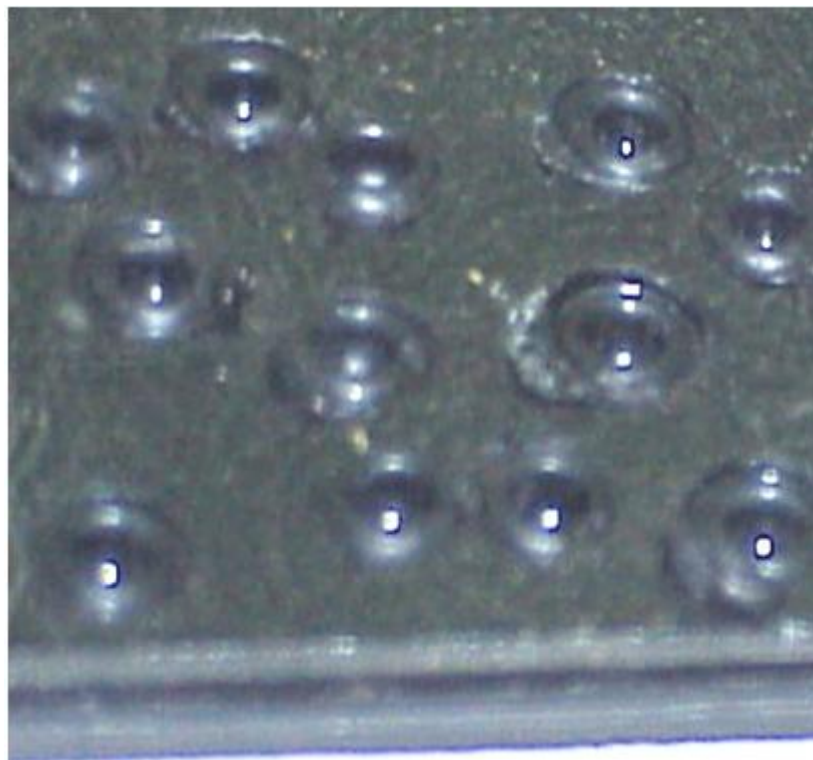


Рисунок 1.6 – Сварные точки

Хорошая энергоэффективность достигается благодаря тому, что нет необходимости в значительных расходах воздуха, а так же не используется водяное охлаждение и так далее.

Так же стоит отметить, что при использовании ультразвуковой сварки не требуются дополнительные расходные материалы такие как:

- 1) Зажимы
- 2) Припой
- 3) Флюс
- 4) Заклёпки
- 5) Клеи
- 6) Смолы

## 7) Различные вспомогательные приспособления

Предметом исследования данной работы является один из узлов данного комплекса ультразвуковой сварки, а именно магнитострикционный преобразователь, а точнее магнитострикционные пластины из которых состоит магнитострикционный пакет.

### 1.4.4 Магнитострикционный преобразователь

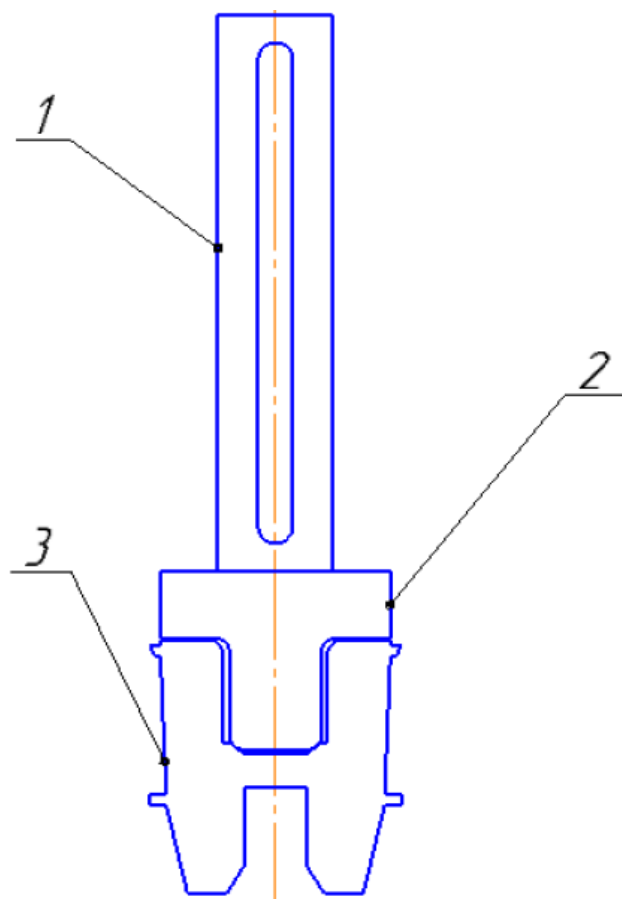
Магнитострикционный преобразователь представляет собой сердечник из магнитострикционного материала и выполняет функцию преобразования энергии магнитного поля в энергию механических колебаний, что делает магнитострикционный преобразователь важным узлом данного оборудования [4].

Преобразователь состоит из магнитострикционного пакета, переходника и волновода, рисунок 1.7 схематично показывает устройство, нужно понимать, что на рисунке показана упрощённая схема без обмотки и прочих необходимых для полноценной работы вещей, связано это с тем, что работа в исследовании велась непосредственно с магнитострикционным пакетом и переходником. Соответственно акцент делается на этих деталях.

Преобразующим элементом в данной конструкции является сердечник, достоинством таких сердечников является отсутствие специальных требований к электроизоляции [5].

Магнитострикционный преобразователь достаточно трудоёмок в производстве, что предопределяет дороговизну изделия, требуется много технологических приемов при производстве.

Особенно в том случае, когда в качестве магнитострикционного материала используется пермендюр. Это обуславливается тем, что необходимо учитывать механические и магнитные свойства сплава одновременно при термообработке.



1 – магнитострикционный пакет; 2 – переходник; 3- волновод

Рисунок 1.7 – Упрощенная схема магнитострикционного преобразователя

Магнитострикционный пакет представляет собой собранные в пакет штампованные пластины из магнитомягкого материала как на рисунке 1.8. Особое внимание уделяется материалу пластин в данном случае магнитострикционные пластины из сплава 49К2ФА, данный сплав также называется пермендюр. Переходник изготавливается из стали 40 и соединяется с пакетом путём пайки, после чего вкручивается в титановый волновод.

Так же возможен вариант склеивания или же спаивания напрямую пакета и волновода. Склеивание предполагает повышение продольной устойчивости преобразователя, но применяется в случае многопакетных магнитострикционных преобразователей с равномерным полем излучения [3].



Пайка титана и магнитоотрицательного пакета осложнена многими факторами, одним из таких является, что пайка происходит после термообработки пластин и повторное длительное воздействие высоких температур может нарушить структуру отожженных пластин.

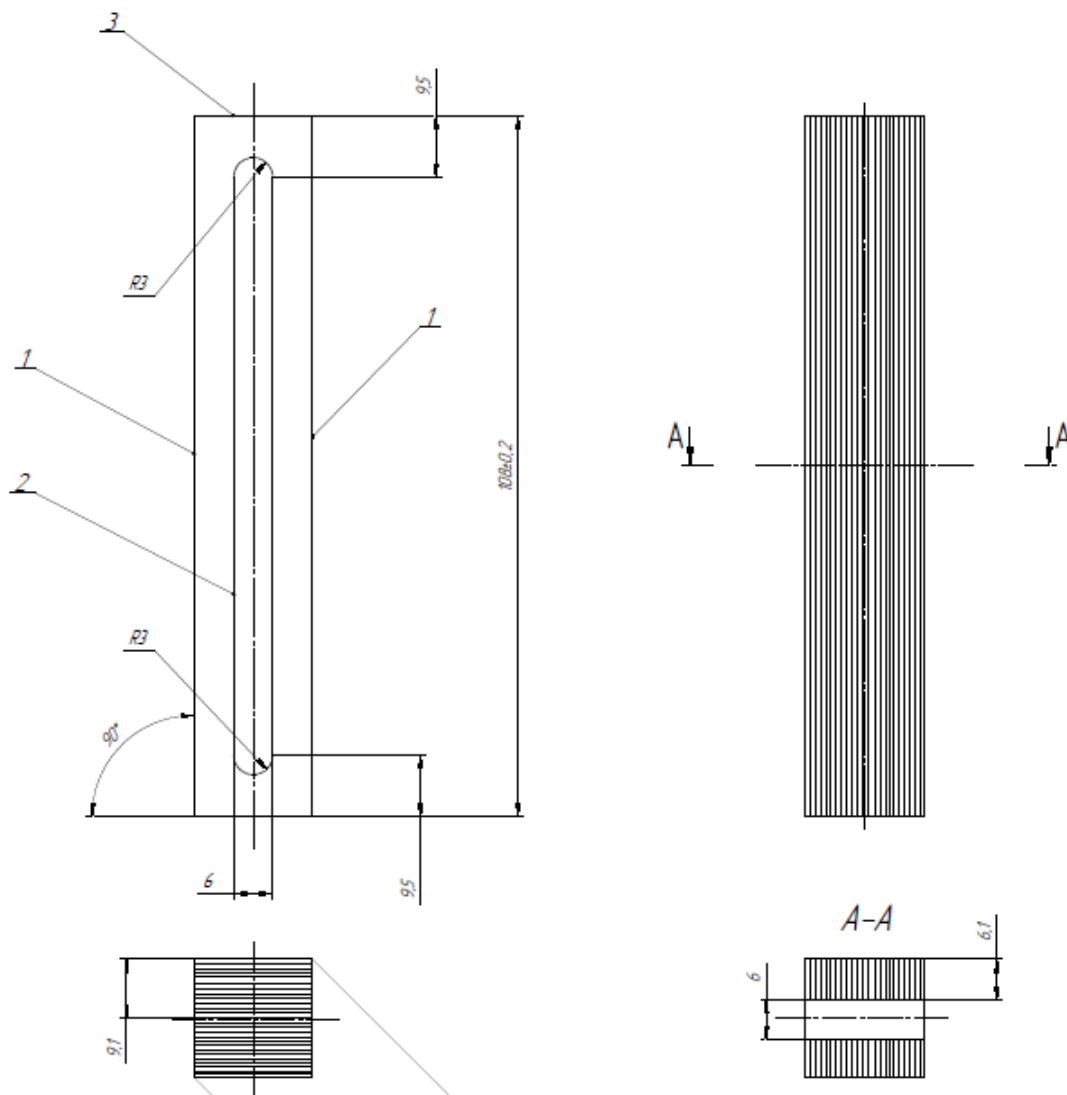


Рисунок 1.8 – Пакет магнитоотрицательный

Пластины собирают в пакет в определённом количестве, количество напрямую зависит от толщины пластин и необходимой амплитуды колебательной системы.

Магнитоотрицательные пластины показаны на рисунке 1.9. Размеры пластин составляют: длина 108 мм, ширина 19 мм, толщина 0,2 мм

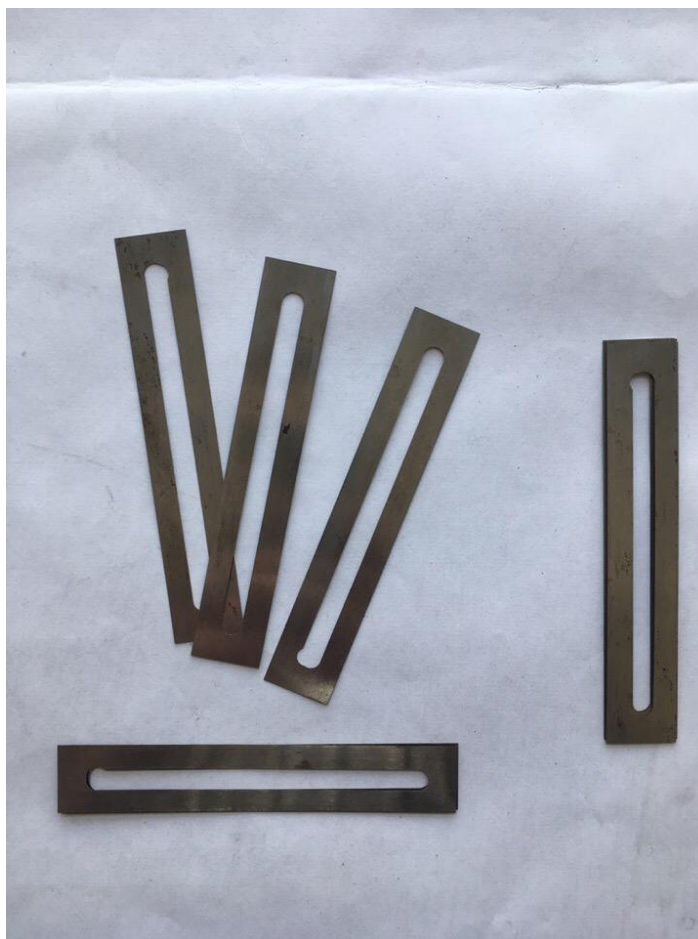


Рисунок 1.9 – Магнитострикционные пластины из сплава 49К2ФА

#### 1.4.5 Свойства и особенности магнитострикционных материалов

Пермендюр сплав кобальта с железом и ванадием. Именно данный сплав с замечательными магнитострикционными свойствами используется в комплексе ультразвуковой сварки, а если точнее именно этот сплав отвечает за создание колебательной системы.

Прецизионный сплав 49К2ФА, также известный как пермендюр причисляется к группе магнитомягких материалов обладающих специальными свойствами, обладающие высокой индукцией насыщения.

При составе 50% на 50%, то есть половина кобальта, и половина железа индукция насыщения доходит до пика своего значения, ванадий добавляют для повышения пластичности сплава в районе 2% [6].

Таким образом, сплав в котором 49%Co, 49Fe и 2%V называют пермендюр [6].

Таблица 1.5 – Химический состав сплава 49К2ФА в %

Fe	Co	V	C	Si	Mn	Ni	S	P
47-50	48-50	1,7-2	до 0,03	до 0,15	до 0,3	до 0,3	до 0,01	до 0,01

Такой состав определяет главные свойства прецизионного сплава, сплав 49К2ФА обладает большой проницаемостью при высоком показателе индукции и точкой Кюри, которая составляет  $980^{\circ}\text{C}$ , также не стоит забывать о высоком показателе магнитного насыщения приближенным к 2,35 Т [6].

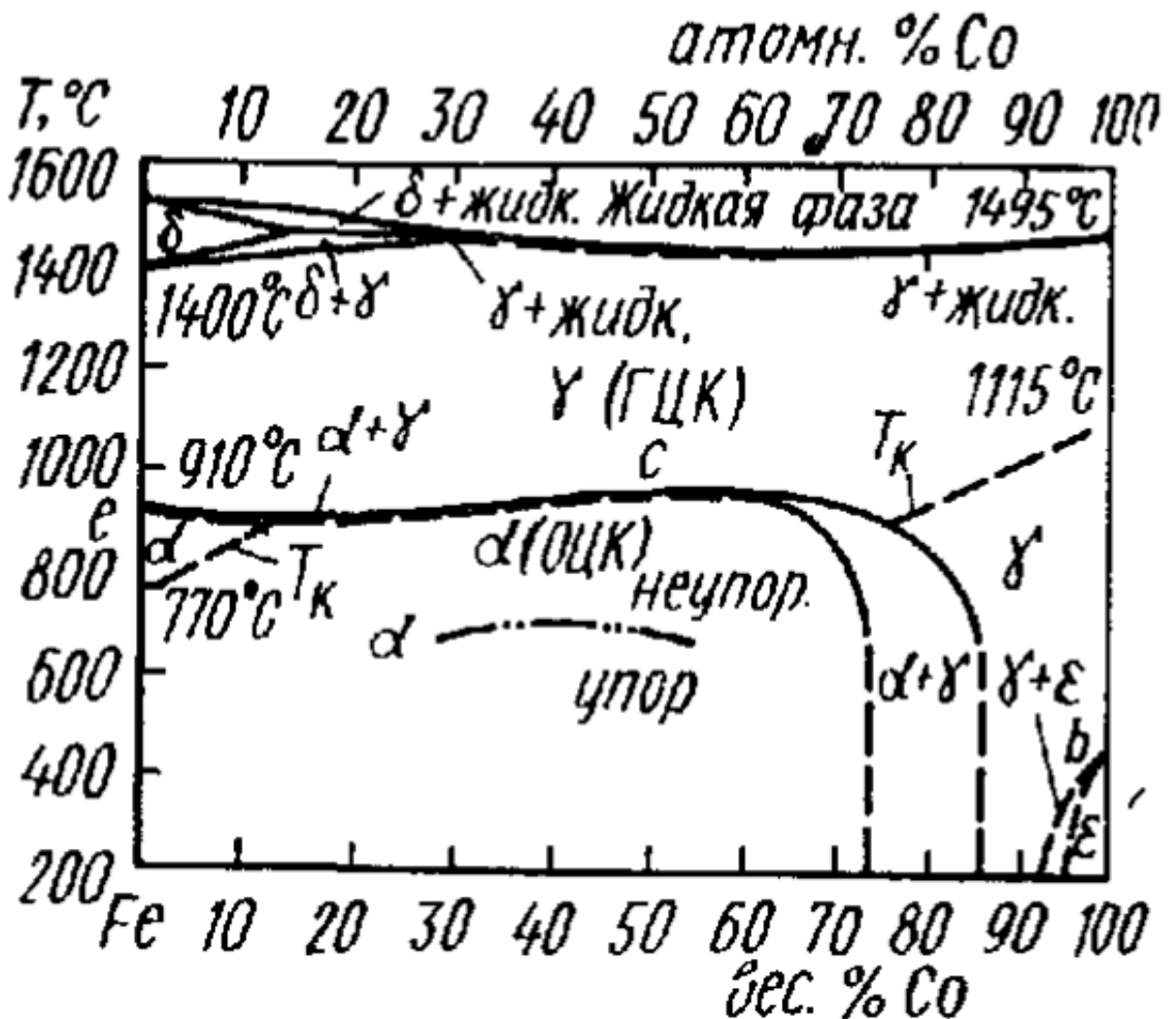


Рисунок 1.10 – Диаграмма фазового равновесия системы железо - кобальт

На рисунке 1.10 диаграмма фазового равновесия системы железо – кобальт и как видно добавление 2%V сопровождается малозаметным изменением данной диаграммы [6].

Таблица 1.6 – Физические свойства пермендюра

Наименование параметров и единиц измерения	Значение
Температура плавления, °С	1370-1400
Рабочая температура, °С	0-500
Теплопроводность, Вт/(м·К)	55,4-75,5
Модуль упругости, МПа	2,2
Плотность, г/см <sup>3</sup>	8,1
Магнитострикция насыщения	+67·10 <sup>-6</sup>
Магнитная индукция насыщения, Тл	2,4
Коэрцитивная сила, А/м	120
Начальная относительная магнитная проницаемость	800
Максимальная относительная магнитная проницаемость	6000
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	0,4·10 <sup>-6</sup>
Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К)	456

Группа прецизионных сплавов, в том числе и пермендюор обладают свойствами ферромагнетика, незначительными потерями на гистерезисе, высокими показателями магнитной проницаемости при небольшой коэрцитивной силе и другими специальными качествами. Намагничивание в сплаве 49К2ФА происходит за счет смещения доменных границ [7].

Напряженность магнитного поля охарактеризовывает коэрцитивную силу по индукции, необходимую для смены величины магнитной индукции. От остаточной величины до полного размагничивания.

Магнито-мягкие материалы по типу сплава 49К2ФА достаточно легко намагничиваются и размагничиваются. А ещё имеют отличительную черту в виде узкой петли цикла гистерезиса [7].

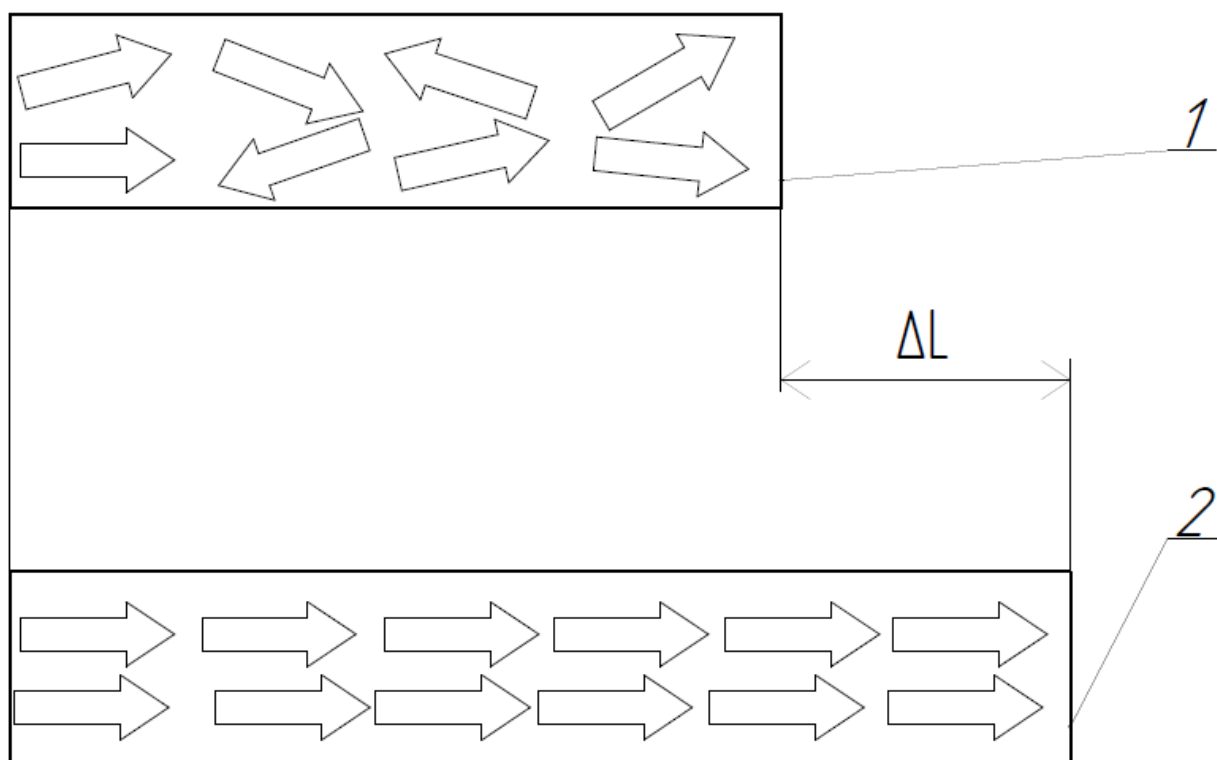
Таблица 1.7 – Механические свойства пермендюра при температуре 20 °С

Наименование параметров и единиц измерения	Значение
Предел текучести, МПа	345
Кратковременный предел прочности, МПа	490
Относительное удлинение при разрыве, %	1

«Изменение ориентации самопроизвольной намагниченности сопровождается деформацией кристаллической решётки, это явление называется магнитострикцией. Магнитострикционные деформации, как и многие другие, созданные дефектами кристаллической решётки или внешними напряжениями, сопровождаются упругими напряжениями кристаллической решётки. При намагничивании упругие магнитострикционные деформации могут перемещаться по кристаллической решётке и взаимодействовать с упругими полями дефектов кристаллической решётки» [6, с. 16].

Если в двух словах описать эффект магнитострикции, то суть данного явления заключается в том, что при намагничивании магнитострикционного тела, тело на которое воздействуют, будет менять свою форму и размеры. Если магнитострикционный материал будет находиться в магнитном поле, то материал начнёт деформироваться и изменять свои размеры некую величину.

Для примера на рисунке 1.11 схематично показан эффект магнитострикции, где при наложении магнитного поля размер меняется на величину  $\Delta L$ .



1 – ферромагнитный стержень в состоянии покоя; 2 – ферромагнитный стержень при воздействии магнитного поля

Рисунок 1.11 – Магнитострикционный эффект

Вследствие обладания такими качествами сплав 49К2ФА используют для изготовления полюсных наконечников, сердечников, соленоидов и магнитов.

Благодаря применению сплава типа пермендюр представляется возможным обеспечить достижение максимальной индукции при малочисленных затратах энергии.

Также сплавы 49К2ФА применяются в радиотехнике, электротехнике, для производства датчиков магнитных полей, магнитных экранов, дросселей. В сфере микроэлектроники материал 49К2ФА применяется для производства

элементов интегральных схем, импульсных трансформаторов, модуляторов, электромашин различных типов, датчиков, преобразователей [6].

## **1.5 Особенности термической обработки прецизионных сплавов**

### **1.5.1 Регламент ГОСТ 10160-75**

Согласно ГОСТ 10160-75 сплав марки 49К2ФА не рекомендуется подвергать предварительной термической обработке. Также допускается применять режимы термической обработки изделий, отличные от режимов настоящего стандарта, в зависимости от условий применения сплава [8].

Отжиг сплава 49К2ФА  $\square$  и  $\square$  класса проводится при температуре нагрева  $(850\pm 20) \square\text{C}$  [8].

Параметры режима термообработки сплава 49К2ФА согласно ГОСТ 10160-75 описываются так, средой отжига является вакуум с остаточным давлением не выше  $10^{-3}$  мм рт. ст. Температура отжига составляет  $(850\pm 20) \square\text{C}$ , скорость нагрева не более  $500 \square\text{C}/\text{ч}$ . Время выдержки от трёх до шести часов. Охлаждение производится двухступенчатое сначала до  $400 \square\text{C}$  со скоростью  $100 \square\text{C}/\text{ч}$ , после чего произвольно под вакуумом до температуры не менее  $150 \square\text{C}$  [8].

Таким образом, ГОСТ 10160-75 выступает эталоном и отправной точкой в исследовании. Начальные исследования и опыты в бакалаврской работе велись с ориентацией на данный документ.

Также в ГОСТе 10160-75 описываются параметры и критерии, которым должны соответствовать обработанные материалы, но так как возможны применения различных режимов, в том числе и отличные от ГОСТа в зависимости от требований к материалу, его специфики и области применения, оценка полученных результатов тоже велась иначе.

Из-за малого количество информации в регламентирующем документе предварительно необходимо провести монографический анализ по вопросу термообработок железокобальтовых сплавов.

Целью такого анализа является получение углублённых знаний касательно того как ведёт себя сплав пермендюр при различных температурах, средах и какие свойства приобретает. Также данный анализ позволит избежать заведомо неудачных экспериментов.

### 1.5.2 Монографический анализ

Как отмечает Ю.С. Карабасов в своей книге «из-за высокой магнитострикции процессы перемагничивания во многом определяются энергией магнитоупругой анизотропии, пропорциональной произведению внутренних напряжений» [9, с. 550].

Из этого утверждения следует, что для снятия данных напряжений необходима длительная термическая обработка с целью релаксации структуры. Также стоит отметить, что у такого отжига должна быть низкая скорость охлаждения [9].

В результате такого режима термической обработки в сплаве пермендюр наблюдается возникновение сверхструктуры. Происходит это явления из-за химического упорядочивания при температурах ниже 730 °С [9].

Как итог материал становится чересчур хрупким, но данная проблема с охрупчиванием решается путём введения в состав сплава ванадия, так как сплав 49К2ФА уже легирован ванадием, данное наблюдение можно не брать в расчет при проведении экспериментальных отжигов.

Так как кобальт относится к переходной группе металлов, то кристаллизация представляется возможной в двух видах и при двух температурных интервалах. Ниже 400 °С кобальту присуща гексагональная решётка, а при температуре выше 400 °С кобальту свойственна кубически гранецентрированная [10].

«Кобальт расширяет, но и замыкает  $\gamma$ -область. Из диаграммы состояния следует, что увеличение содержания кобальта до 50% не должно вызвать



каких-либо заметных изменений, как в структуре, так и в температуре превращения по сравнению с чистым железом. Так же магнитное насыщение возрастает с увеличением содержания кобальта, повышение насыщения железа за счёт введения 30-50% Co на 10% имеет большое практическое значение» [10, с. 931].

«Кобальт задерживает рост зерна при повышенных температурах, поэтому кобальтовые сплавы малочувствительны к перегреву и имеют расширенный интервал температур закалки по сравнению с углеродистыми сталями» [10, с. 934].

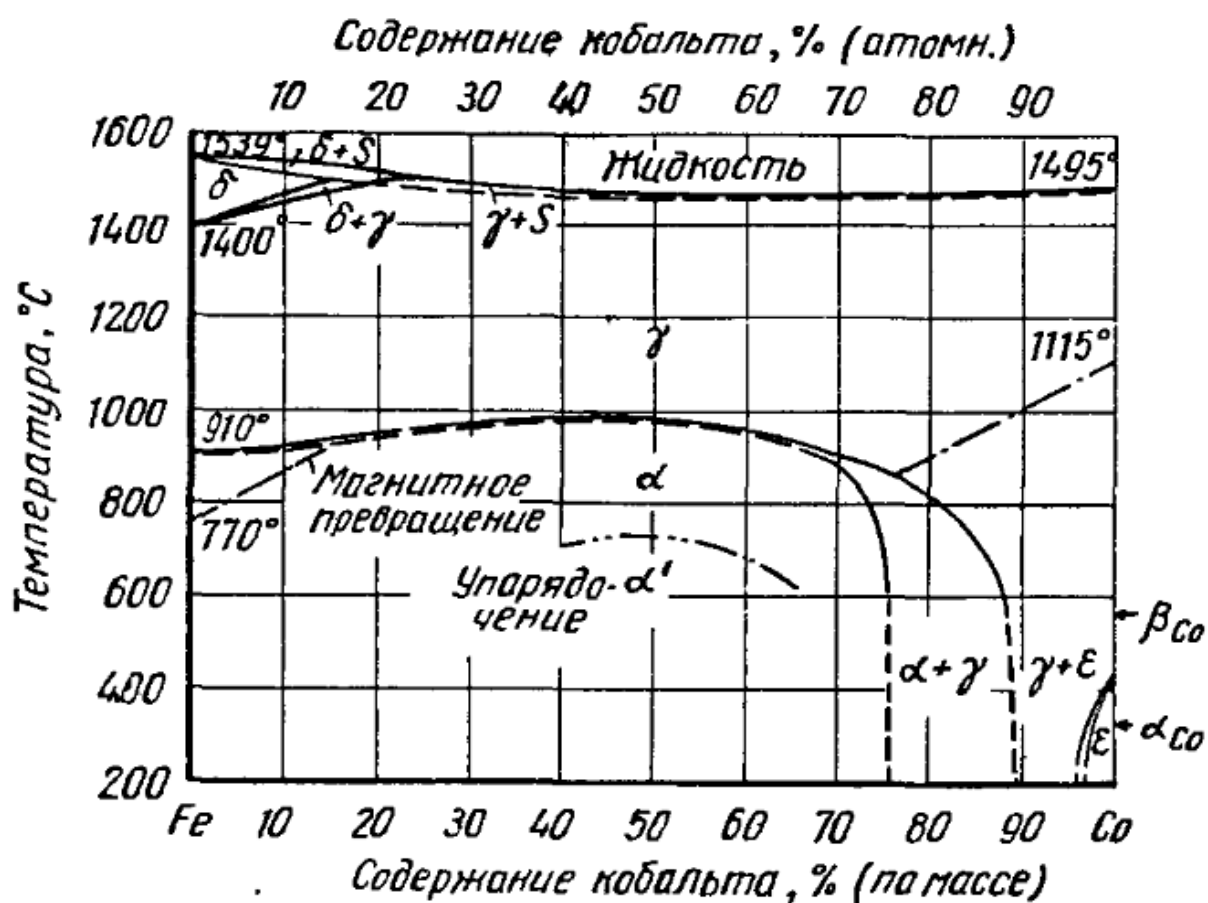


Рисунок 1.12 – Диаграмма состояния Fe-Co

Так как при механической обработке не редки трудности, то для устранения некоторых из них представляется возможным проводить предварительную термическую обработку в вакууме или водороде при

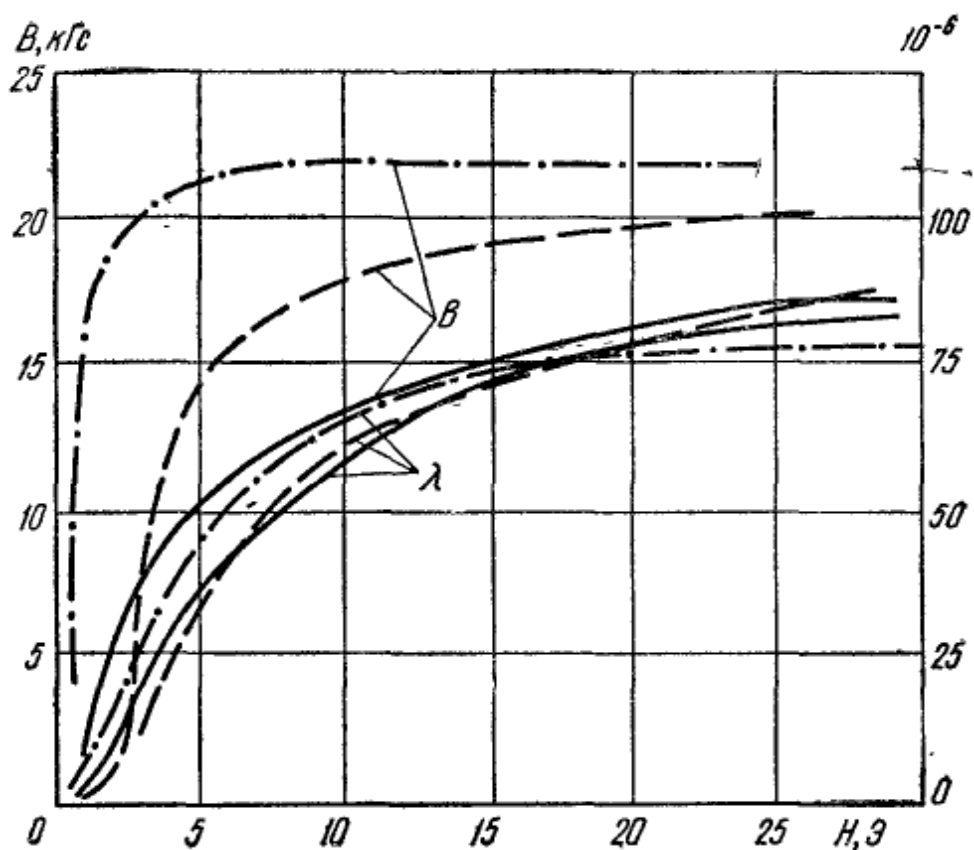
температурах 800-900 °С, данная операция улучшает технологические свойства прецизионных сплавов [11].

Режимы таких термических обработок для пермендюра почти схожи с режимом термообработки по ГОСТ 10160-75, за исключением двух отличий.

Различия заключаются в выдержке, если выше описывалось от трёх до шести часов, то тут предлагается от часа до трёх. Охлаждение почти такое же двухступенчатое, но тоже имеет отличия 100 °С в час до 300 °С, а после произвольное охлаждение [11].

Данные параметры режимов рассчитаны на получение максимальных значений магнитострикции в магнито-мягких сплавах [11].

Данные некоторых параметров после таких отжигов приведены на рисунках 1.13 и 1.14.



Сплошные линии – сплав 8Ю; штриховые линии – сплав 65К; штрихпунктирные линии – сплав 50КФ

Рисунок 1.13 – Зависимость магнитострикции и индукции сплавов от

напряженности поля

Сплав 50КФ представляет пермендюр следовательно данные частично применимы и к сплаву 49К2ФА.

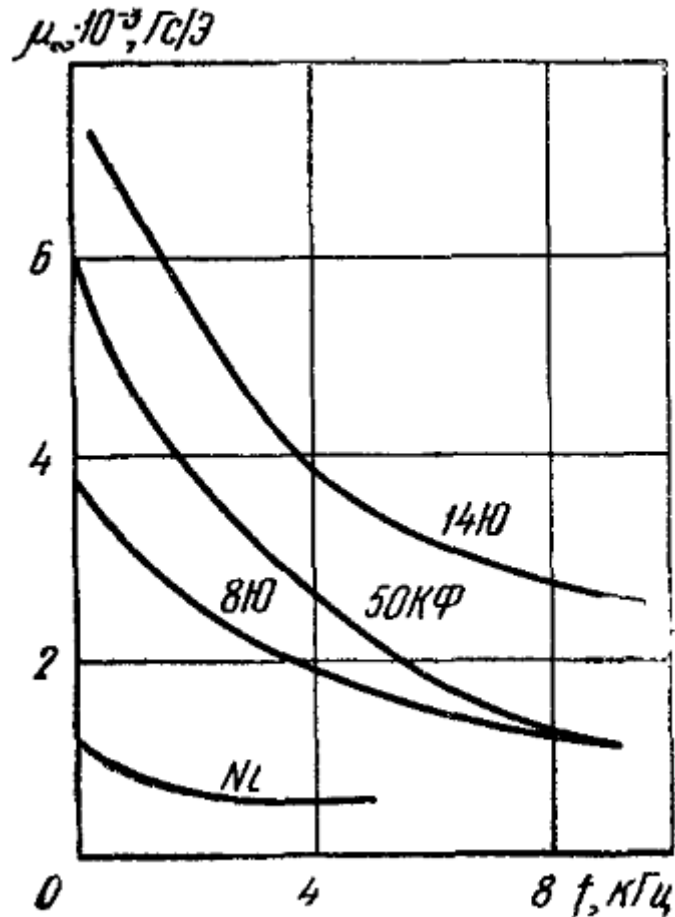


Рисунок 1.14 – Зависимость магнитной проницаемости различных сплавов толщиной 0,2 мм от частоты при индукции в 3кГс

Так же магнито-мягкие сплавы подвергают термической обработке в магнитном поле. Режим такой обработки представляет собой нагрев до температуры до 800-850 °С, выдержка при данной температуре от трёх до пяти часов и охлаждение в магнитном поле 60 °С в час [7].

Результатом такого отжига является прямоугольная петля гистерезиса с неплохим коэффициентом прямоугольника, который составляет 0,92 [7].

«Термическая обработка магнестрикционных железокобальтовых сплавов заключается в охлаждении от температуры 800-850 °С со скоростью 50-100 °С/ч» [7, с. 309].

Из данного наблюдения И.Б. Кекало можно предположить, что скорость охлаждения очень значимый параметр, связано это, скорее всего с образованием приемлемой структуры, которая в последующем обладает хорошими магнитными свойствами.

### 1.5.3 Анализ исследовательских работ и статей

Параллельно с поиском и изучением профильной литературы касательно свойств пермендюра и влияние на этот сплав различных режимов, а так же изучение структуры, велся поиск и анализ работ и статей на схожую тематику. А именно термообработка магнитомягких и магнестрикционных материалов, как оказалось в этом направлении есть ряд интересных работ, которые имеют ценность и для этого исследования, благодаря этим данным появилась возможность исключить некоторые заведомо неправильные режимы термической обработки и скорректировать экспериментальные режимы. Далее будут описаны некоторые выдержки из этих работ, которые в свою очередь являются частью базы этого исследования, авторы и ссылки приведены в списке используемых источников.

Одним из таких является диссертационная работа А.В. Чижова, в данной работе приведены режимы и получаемые свойства отжига сплава 49К2ФА.

«Во время отжига происходят процессы гомогенизации и атомного упорядочивания, выравнивается химический состав и совершенствуется структура дефектов кристаллической решётки сплавов и сталей, что приводит к повышению магнитных свойств, поскольку облегчается процесс смещения доменных границ» [12, с 20].

Термообработка материала в работе А.В. Чижова проводилась в вакуумной электропечи сопротивления, тем не менее, параметры режимов отличались от ГОСТа 10160-75, так как был проведён ряд экспериментальных термообработок с выявлением наилучших результатов при определённых параметрах режима.

На рисунке 1.15 приведена диаграмма режимов термической обработки, которые были проведены в исследованиях с вакуумной печью.

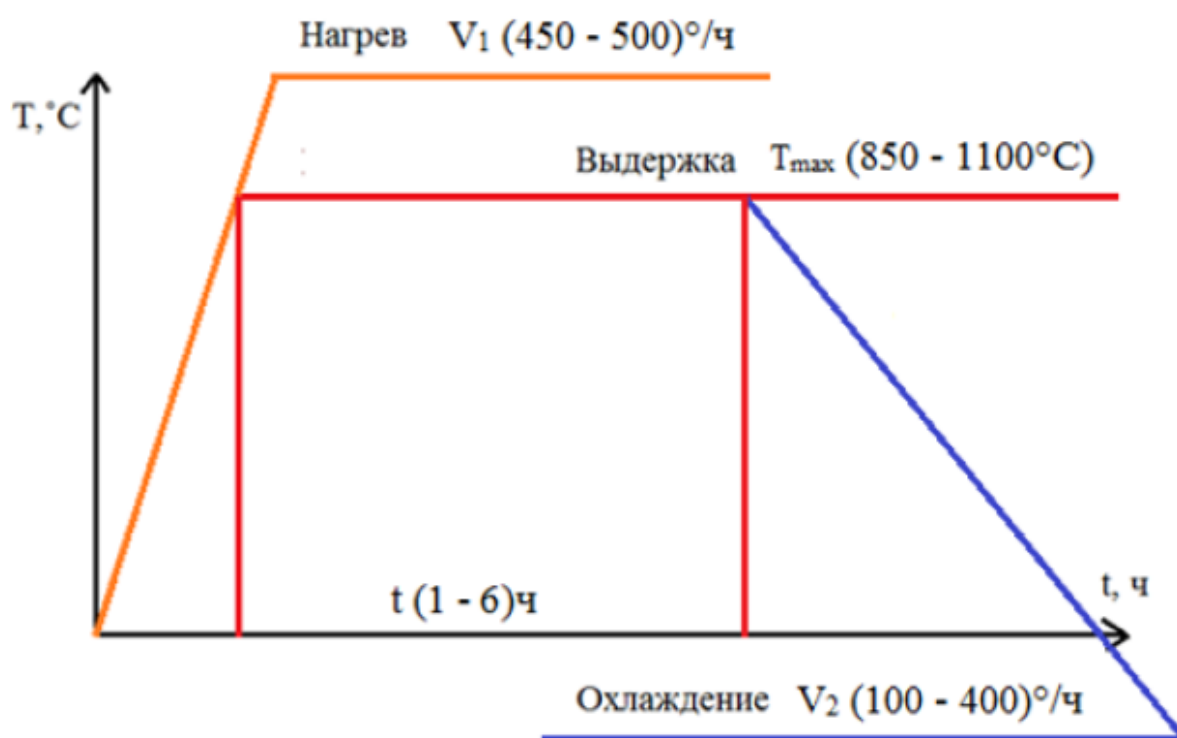


Рисунок 1.15 – Диаграмма режимов термообработок в работе А.В. Чижова

Из ряда экспериментов и их результатов были выявлены полезные данные применительно для данного исследования, такие как скорость нагрева, максимальная допустимая температура, время выдержки и скорость охлаждения.

Исходя, из анализа информации следует, что низкая скорость нагрева печи нежелательно с экономической точки зрения, лишняя трата электроэнергии и времени. Касательно максимальной допустимой температуры было установлено два благоприятных интервала это 850-900 °С и 1050-1100 °С, но при более высокой температуре необходимо

увеличивать время выдержки для снятия напряжений, но это чревато такими последствиями как неконтролируемым ростом зёрен и потерей магнитных свойств. Время выдержки было установлено в трёх направлениях три, четыре и шесть часов. Скорость охлаждения варьируется в пределах 100 °С, но при одноступенчатом режиме [12].

Ещё одним интересным источником является статья Г.В. Пшеченковой и Т.В. Краснопевцевой в которой так же проводились исследования железокобальтовых сплавов в данной работе стоит отметить такие особенности как, критические точки сплава с содержанием 50% кобальта в зависимости от содержания ванадия, влияние нагрева на твёрдость и собственно сам режим термической обработки.

Таблица 1.8 – Критические точки сплава с содержанием 50% кобальта в зависимости от ванадия [13]

Содержание ванадия, %	Температура, °С	
	Начала превращения при нагреве	Конца превращения при охлаждении
0,00	980	980
1,38	915	870
1,68	885	810
1,95	720	600
4,0	700	555

В данном случае стоит обратить внимание на содержание 1,95% так, как сплав 49К2ФА содержит порядка 2% ванадия.

Данное исследование говорит о том, что различные сплавы, полученные разными способами, имеют различные режимы термообработок, что касательно полезной информации, то это режим термообработки для пластин толщиной 0,2 мм.

Режим представляет собой температуру отжига 850-900 °С в водороде или вакууме с выдержкой в районе пяти или десяти часов и медленным охлаждением 50-100 °С [13].

«Данные полученные на образцах двух плавки, прокатанных до 0,2 мм со степенью обжатия 60%, показывают, что наилучшую проницаемость имеют образцы, медленно охлаждённые до 400-300 °С» [13, с. 8].

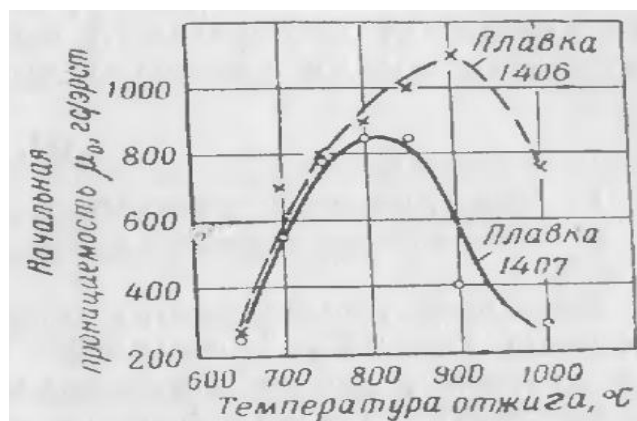


Рисунок 1.16 – Зависимость начальной проницаемости образцов толщиной 0,2мм от температуры отжига

Также отмечается, что для достижения наибольшего значения ферромагнетизма при наивысших температурах рекомендуется использовать железокобальтовые сплавы, не содержащие ванадия [13].

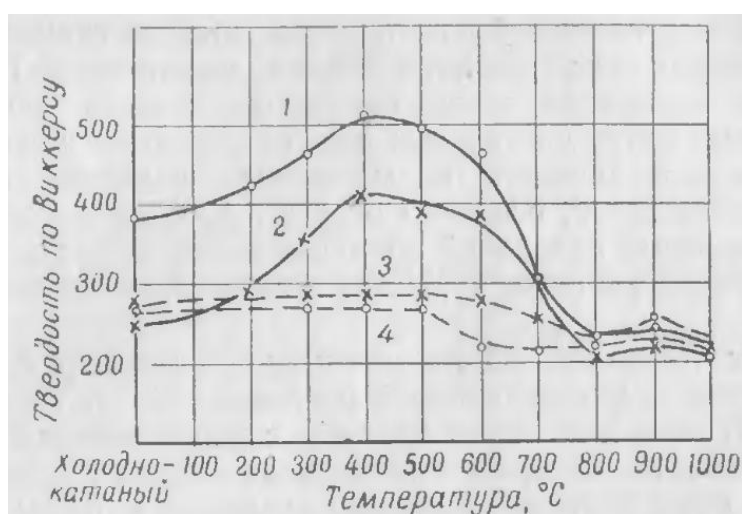


Рисунок 1.17 – Влияние нагрева на твердость образцов

Наиболее приближённый режим по параметрам и методу проведения является патент под авторством В.Н. Букарева и В.П. Перфиловой.

Этот способ преследует цель повышения качества оксидирования пластин, повышения пластичности и повышения магнитных свойств [14].

Подобная технология была опробована ещё в бакалаврской исследовательской комплексной работе, но с другими параметрами режима и условиями термообработки. То, что при термообработке возможно проводить оксидирование ещё один положительный эффект при отжиге в контролируемой атмосфере.

Отличием данного исследования от патента является сплав, для которого проводят термообработку, а так же методика. В патенте обрабатываемым материалом является сплав с содержанием 20-30% кобальта.

Режим представленный в патенте подразумевает под собой нагрев печи до 720-800 °С, время выдержки варьируется от 40 минут до 1 часа 10 минут, отжиг производится в контейнере в атмосфере антрацита смоченного водой. Также особое внимание уделяется дроблению и размеру гранул антрацита. Режим охлаждения 100-150 °С в час до 300 °С, а после произвольное охлаждение [14].

Далее поиск вёлся среди иностранных работ, а именно на Doag.org и www.academia.edu, данные сайты представляют собой справочники журналов открытого доступа и большинство работ для публикации переводятся авторами на английский язык, поэтому данный ресурс обладает научными статьями из обширного списка стран.

Поэтому далее пойдут иностранные источники переведённые студентом данной работы с указаниями на поведение структуры и влияния температур на магнитные сплавы.

Обычно  $\alpha$ -Fe имеет тенденцию расти во время отжига и выпадает в осадок раньше, чем  $Nd_2Fe_{14}B$ . Это отчётливо видно, однородное



распределение мелких зерен имеет большое значение для получения эффективной обменной связи. Фишер предположил, что оптимальная микроструктура состоит из небольших мягких магнитных зерен размером около 10 нм и твердых магнитных зерен со средним диаметром зерна около 20 нм [15].

Сразу после формирования ленты, материал герметизировали в кварцевой трубке под вакуумом  $4.5 \times 10^{-4}$  мбар, после чего отжигали при четырех разных температурах (600 °С, 650 °С, 700 °С, и 750 °С) в течение 10 минут и затем охлаждали в воде [15].

Было обнаружено, что количество мягких и твердых фаз увеличивается с повышением температуры, что свидетельствует о том, что повышение кристалличности было обусловлено термообработкой.

На рисунке 1.18 показана микроструктура поверхности отожженных образцов. Как видно, более темные части микрофотографий составляют  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , а более светлые части связаны с фазой  $\alpha\text{-Fe}$ . Очевидно, что микрофотографии показывают, что происходит рост зерна. Средний размер зерна спеченного тела измерялся более чем 200 зернами методом секущей [15].

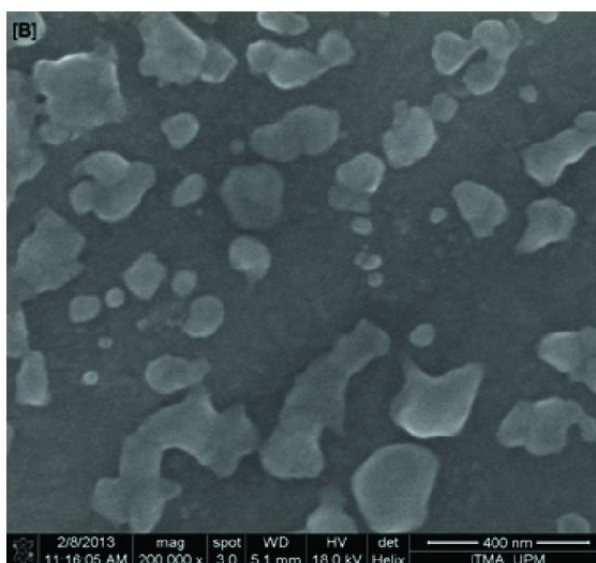


Рисунок 1.18 – Микроструктура отожженных образцов

Как правило, рост зерен, возникающий при более высоких температурах, приводит к ухудшению магнитных свойств; следовательно, термическая обработка при 750 °С приводит к более низким свойствам, чем при температуре отжига 700 °С [15].

На рисунке 1.19 показана зависимость размера зерна от температуры отжига.

Исследования показывают, что магнитные свойства сплавов FeCo можно использовать в полной мере, только путем применения холодного рабочего процесса в сочетании с соответствующей термообработкой. Например, в зависимости от параметров отжига коэрцитивная сила сплавов FeCo- ~ 7 вес.% V изменяется от 3,0 до 11,0 кА/м, а остаточная индукция составляет от 0,13 до 1,01 Тл [16].

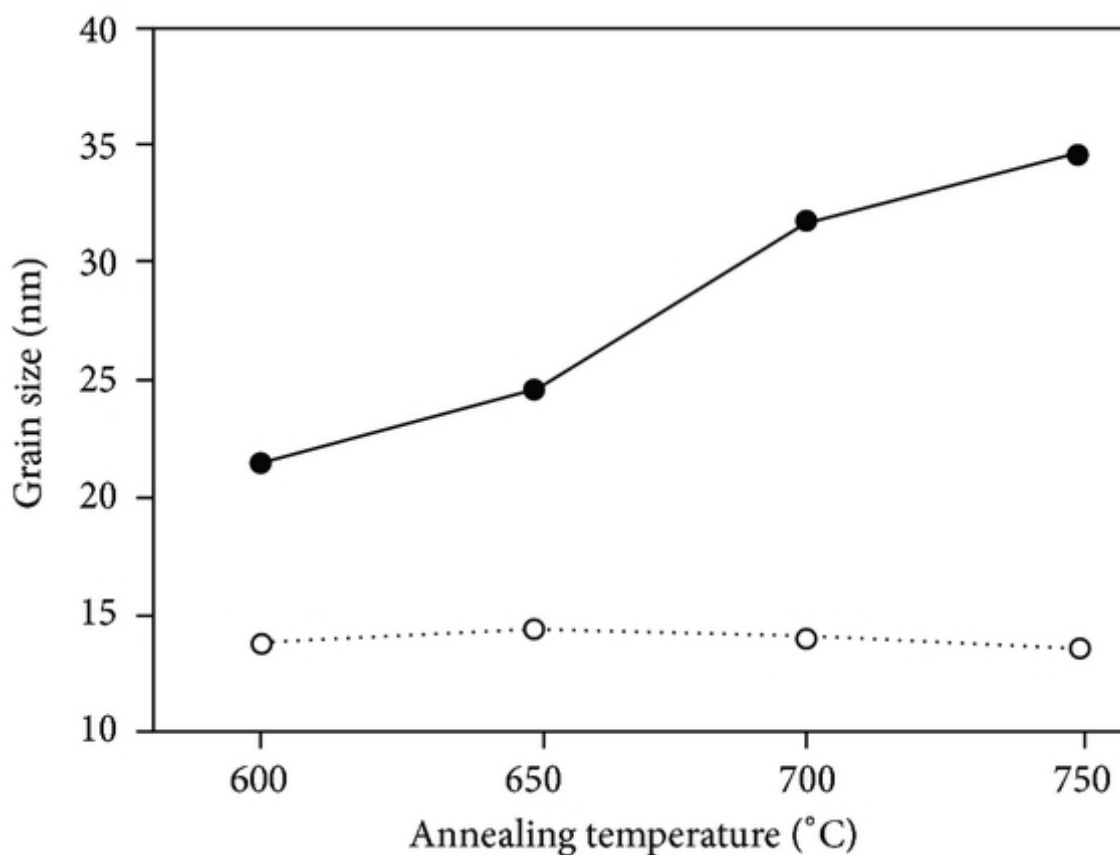


Рисунок 1.19 – Зависимость размера зерна от температуры отжига

Известно, что на магнитные параметры влияет большинство типов структурных дефектов, то есть дислокации, границы зерен и осадки. Поэтому

характеристики границ зерен сплавов FeCo-V могут быть очень важными и перспективными для соответствующих ученых и инженеров [16].

Образцы отжигали в вакуумной атмосфере при 400, 550, 650, 750 и 850 °C в течение 120 минут с последующим охлаждением аргоном /печью со скоростью 100 °C/ч. Микроструктура образца, отожженного при 850 °C, в основном состояла из перекристаллизованных зерен с прямыми и гладкими границами [16].

Эти результаты хорошо согласуются с результатами Бакли и Райковича, которые сосредоточены на рекристаллизационном поведении сплавов FeCo, содержащих небольшие количества V или Cr. Их результаты показали, что в сплавах FeCo происходит перекристаллизация выше 725 °C, что связано с возникновением разупорядочения. Но, между 500 °C и 725 °C, сплав упорядочивается быстро, и за этим следует очень медленная рекристаллизация. Поэтому предполагается, что если холодный обработанный материал отжигается ниже 750 °C, то взаимодействие между реакциями упорядочения и рекристаллизации приводит к очень сложной структуре поведения [16].

Однако FeCo обладает высокой магнитострикцией и восприимчив к стрессовым анизотропиям. Действительно, наличие сжимающего или растягивающего напряжения может привести к дополнительному источнику магнитной анизотропии, что влияет на магнитную структуру образца. В частности, помимо индуцирования механической деформацией, наличие собственного напряжения может благоприятствовать условиям роста [17].

Экспериментальные результаты показали, что добавление Co уменьшает термостабильность в противовес кристаллизации аморфной фазы и, таким образом, улучшает температуру термической обработки магнитомягкого сплава [18].

Сплавы Fe-Co, являющиеся магнитострикционными материалами, обладают благоприятными характеристиками, которые обладают высокой

прочностью, пластичностью и отличной обрабатываемостью, что позволяет легко изготовить волокна сплава Fe-Co [19].

Было обнаружено, что заметное улучшение магнитомягкого поведения связано с уменьшением эффективной магнитной анизотропии, которая возникает, когда размеры нанокристаллов становятся сравнимыми с длиной магнитного обмена [18].

### **1.6 Применяемый способ пайки**

По причине того, что магнестрикционный пакет это набор пластин, а один из его торцов соединяется с переходником, показанным на рисунке 1.20. Одним из наилучших и эффективных методов создания соединения между переходником и магнестрикционным пакетом является индукционная пайка.



Рисунок 1.20 – Стальной переходник

Выбор именно такого типа пайки связан непосредственно с тем, что место пайки располагается не слишком благоприятно для других методов, но основная причина это магнестрикционный пакет, а точнее его структура. Так как пайка производится после термической обработки пластин,

необходимо избегать длительных воздействий высоких температур, применяя локальный нагрев.

Пайка производится на установке высокочастотного индукционного нагрева СЭЛТ-001-15/44Т, технические характеристики приведены ниже в таблице 1.9.

Таблица 1.9 – Технические характеристики установки СЭЛТ-001-15/44Т

Наименование параметров и единиц измерения	Значение
Максимальная потребляемая мощность, кВт	15
Максимальная колебательная мощность, кВт	14,2
Коэффициент полезного действия, %	95
Напряжение питающей сети, В/Гц	380/50
Максимальный потребляемый ток фазы, А	25
Частотный диапазон преобразования, кГц	15-50
Выходное напряжение преобразователя, В	33
Максимальный выходной ток преобразователя, А	600
Минимальный расход охлаждающей воды индуктора, л/мин	3
Номинальная продолжительность включения, %	100
Время непрерывной работы, ч	16

Выбор припоя исходил из уже описанных выше условий, необходимо использовать такой припой, который обеспечит затекание в зазоры и обеспечит наиболее быструю пайку, что бы избежать повреждения структуры магнитострикционных пластин. А так же стоит учитывать паяемые материалы Сталь 40 и сплав 40К2ФА. Такими припоями выступают припой ПСр 40 и ПСр 45. Температура пайки данных припоев варьируется в пределах 720-750 °С, что для данных паяемых материалов очень хорошо. Применяемый флюс при таких припоях является ФК-250.

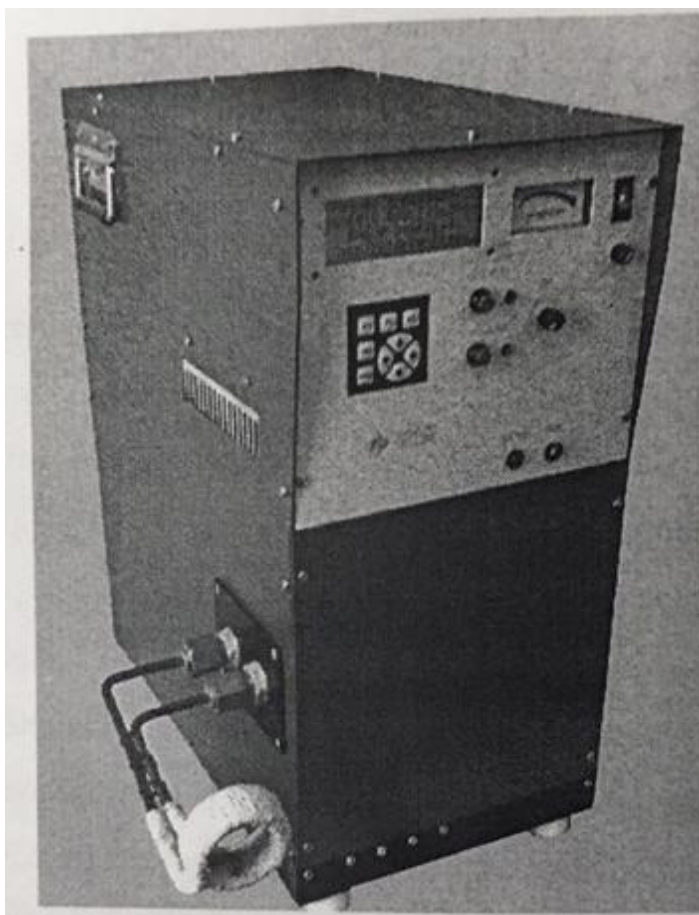


Рисунок 1.21 – Установка СЭЛТ-001-15/44Т

Процесс пайки можно описать так, изделия в собранном виде помещаются в индуктор, после этого засыпается флюс вместо пайки. После того как флюс расплавится, а температура по показаниям пирометра достигнет интервала в  $700-750\text{ }^{\circ}\text{C}$  начинается пайка, в этот момент подводят пруток припоя, облуживая поверхности магнестрикционного пакета и переходника и паяются до формирования галтели. После установка отключается, а детали остывают. На рисунке 1.22 показан результат индукционной пайки по данному режиму.

Данный способ хорошо себя зарекомендовал, но имеется возможность снизить затраты производства магнестрикционного преобразователя заменой способа индукционной пайки на печную пайку. А именно путём замены припоев и исключения флюса из технологической операции, а также

имеется возможность объединения нескольких технологических операций, таких как термообработка и пайка.



Рисунок 1.22 – Результат индукционной пайки

### **1.7 Задачи магистерской диссертации**

Ввиду налаживания мелкосерийного производства комплексов ультразвуковой сварки листовых пластмасс, в стенах университета, возникла идея о проведение исследования возможностей пайки и термообработки магнестрикционных материалов в электропечах сопротивления с контролируемой атмосферой.

Так как существующие методы предлагают, достаточно опасные и дорогие способы, вопрос о поиске альтернативы остаётся открытым. На данный момент отжиг проводится в вакуумных печах, но вакуумное оборудование помимо того, что дорогое, так ещё и требует квалифицированных специалистов, также стоит отметить длительность такого процесса, так как нагрев и охлаждение таких печей занимает время, которое возможно сократить путём использования печей с контролируемой атмосферой.

А перспектива совместить несколько процессов таких как, пайка, отжиг и оксидирование выглядит очень привлекательной и позволит сократить как время производства, так и себестоимость магнитострикционных преобразователей.

Но для достижения или приближения к подобным результатам необходимо обозначить и решить поставленные задачи:

1. Исследование возможностей термической обработки магнитострикционных материалов в электропечи с контролируемой атмосферой;
2. Исследование возможностей пайки магнитострикционных материалов способом печной пайки;
3. Исследование возможностей объединения таких технологических операций как, пайка, отжиг и оксидирование в один термический цикл;



## **2 Исследование возможности термообработки**

### **2.1 Методика проведения экспериментального отжига**

Оборудование и инструменты используемые в данном исследовании располагались на территории Тольяттинского государственного университета, а именно на кафедре «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы» в корпусе А аудитории 403.

Данная аудитория используется как для лекций, так и для проведения лабораторных и исследовательских работ, так как оборудована всем необходимым для проведения исследований.

Благодаря литературному и монографическому анализу, были определены параметры режимов экспериментальных термообработок, они будут приведены далее, но сначала необходимо описать использованную методику и оборудование.

Магнитострикционные пластины сплава 49К2ФА поставлялись заказчиком и дополнительных операций перед проведением термической обработки не требовалось. Для проведения одного отжига использовалось четыре магнитострикционные пластины.

Порядок проведения опыта для всех случаев в основном был един и описан ниже.

Сборка испытуемых материалов производилась следующим образом, пластины (рисунок 2.1) в количестве четырёх штук зажимались в струбцину (рисунок 2.2), струбцина также поставлялась заказчиком и подходит для многократных влияний высоких температур, пластины стягивались болтами, но не сильно, для того что бы провести оксидирование пластин. Электрод печь включалась до начала данного процесса, так как загрузка происходила по достижению необходимой температуры, связано это с тем, что бы, не подвергать пластины чрезмерному влиянию температуры



Рисунок 2.1 – Поставляемые магнитострикционные пластины



Рисунок 2.2 - Струбцина

После сборки пластин в струбцину следовала подготовка контейнера, контейнер представлен на рисунке 2.3. Контейнер предварительно зачищался наждачной бумагой. В контейнер засыпался древесноугольный карбюризатор в объёме примерно 60-70г (рисунок 2.5). Необходимое количество высчитывалось в зависимости от объёма контейнера, также стоит учитывать, что это экспериментальные опыты и в случае чего, с излишками карбюризатором ничего не случится.



Рисунок 2.3 –Контейнер



Рисунок 2.4 – Подготовка контейнера



Рисунок 2.5 – Древесноугольный карбюризатор

После того как засыпался карбюризатор в контейнер укладывалась струбцина, после контейнер закрывался крышкой и продолжался процесс подготовки контейнера. А именно установка термопары (рисунок 2.6) для замеров температуры внутри контейнера для этих целей использовался измеритель ТРМ-202 (рисунок 2.7). Нюансы установки термопары заключаются в том, что необходимо плотно зажать термопару между крышкой и дном контейнера, именно так замеры температуры будут обладать наивысшей точностью, в противном случае термопара будет замерять температуру всего чего угодно кроме необходимой температуры внутри контейнера. Оплошность, допущенная при установке, проявляется в разнице температур показываемых электропечью и температурой измерителя. Разница в большинстве случаев составлял порядка 30-35 °С, в

случае когда установка происходила успешно, разница температур отсутствовала или же составляла десятые доли.

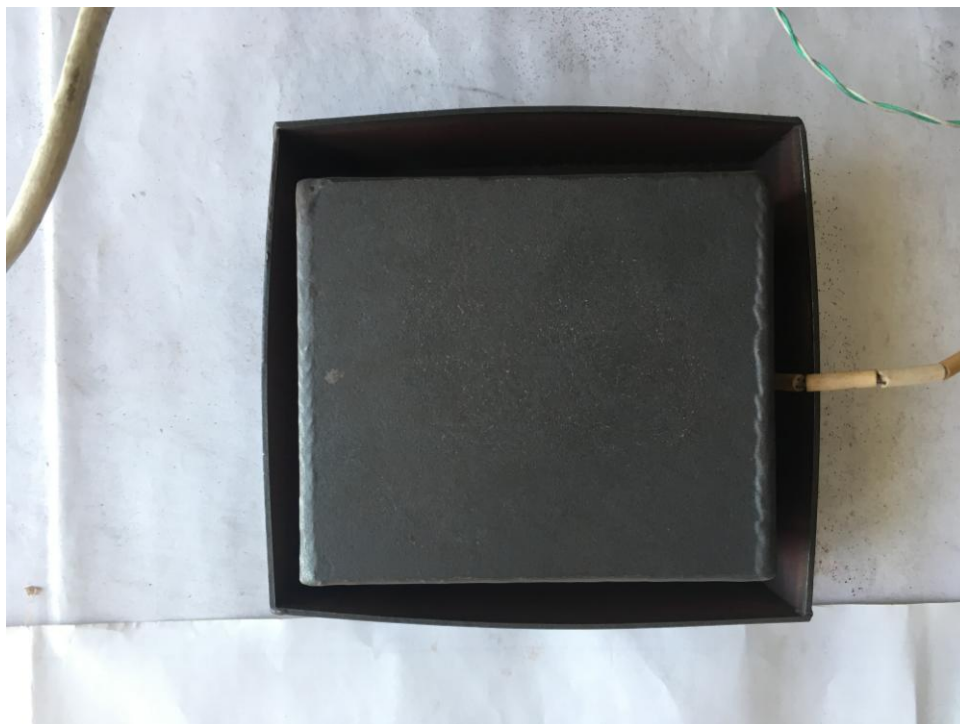


Рисунок 2.6 – Установка термопары



Рисунок 2.7 –Измеритель TRM-202

После установки термопары продолжалась сборка, контейнер необходимо герметизировать. Герметизация производилась путём укладки в затвор контейнера песка и древесноугольного карбюризатора в три слоя как показано на рисунках 2.8, 2.9 и 2.10.



Рисунок 2.8 – Укладка первого слоя

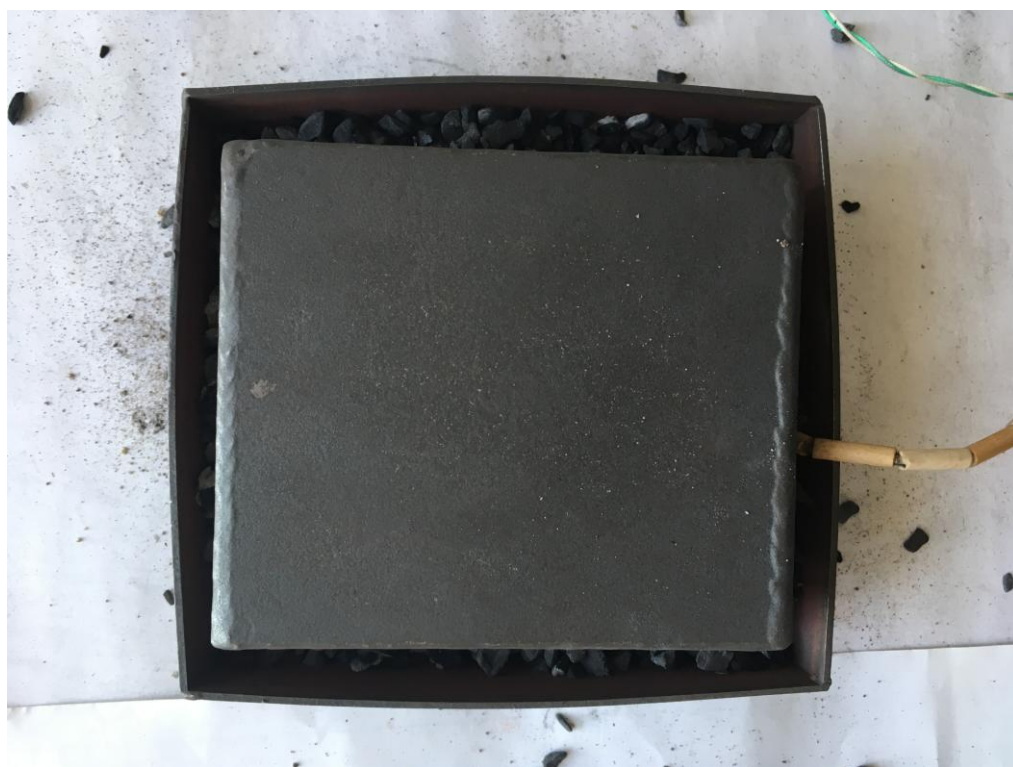


Рисунок 2.9 – Укладка второго слоя

Подобная укладка необходима для того, чтобы максимально ограничить попадание воздуха под крышку контейнера. Сначала первым слоем засыпается песок в объёме  $1/3$  от объёма затвора, после засыпается слой древесноугольного карбюризатора, который при выгорании будет ограничивать поступление воздуха внутрь контейнера, третьим слоем идёт песок также в количестве  $1/3$ , после всё необходимо утрамбовать и досыпать песок поверх третьего слоя. Песок используется прокаленный, количество песка считать не приходится, так как необходимо обеспечить плотную герметизацию.



Рисунок 2.10 – Укладка третьего слоя

После того как песок утрамбован и досыпан поверх третьего слоя, подготовку контейнера можно считать завершённой.

Контейнер готов к загрузке, необходимо подождать пока печь наберёт необходимую температуру, после чего производилась загрузка.

Для отжига использовалась лабораторная электропечь сопротивления СНОЛ 6/12 показанная на рисунке 2.11, также для загрузки использовались ухват и огнеупорные перчатки, показанные на рисунке 2.12.



Рисунок 2.11 – Лабораторная электропечь сопротивления СНОЛ 6/1



Рисунок 2.12 – Ухват и огнеупорные перчатки



После достижения электропечью заданной температуры производилась загрузка подготовленного контейнера, так как для замеров дополнительно использовался измеритель, загрузка производилась с лаборантом для того чтобы не нарушить контакт термопары и безопасно установить измеритель.

По завершению данной операции, производились замеры температуры в определенные промежутки времени, и собственно проводилась операция термообработки.



Рисунок 2.13 – Процесс отжига

## 2.2 Экспериментальные данные опытов по термообработке

Теоретическим и экспериментальным путём были установлены оптимальные параметры режимов термических обработок. Используя анализ прошлых работ проведённых во время исследований для бакалаврской выпускной работы, были учтены недостатки и положительные факторы [20, 21, 22, 23].

Замеры температуры велись каждые 5-10 минут в зависимости от опыта, графики строились с шагом в 30 минут, в некоторых опытах замер начинался с момента загрузки контейнера в печь, далее будут представлены режимы и краткое описание проводимых опытов. Для удобства будет введена нумерация опытов, но это не означает истинный номер опыта, для освещения в данной работе выбирались опыты по различиям в режимах и получаемых результатах, а также разный период времени проведения.

Опыт № 1, нагрев проводился до 800 °С запасом в 50 °С для того чтобы прогреть печь, выдержка проводилась при температуре 750 °С длительность выдержки 30 минут, охлаждение проводилось со скоростью 88 °С/ч с температуры 750 °С до 400 °С длительность охлаждения 4 часа, после контролируемого охлаждения шло охлаждение с печью график представлен на рисунке 2.14.

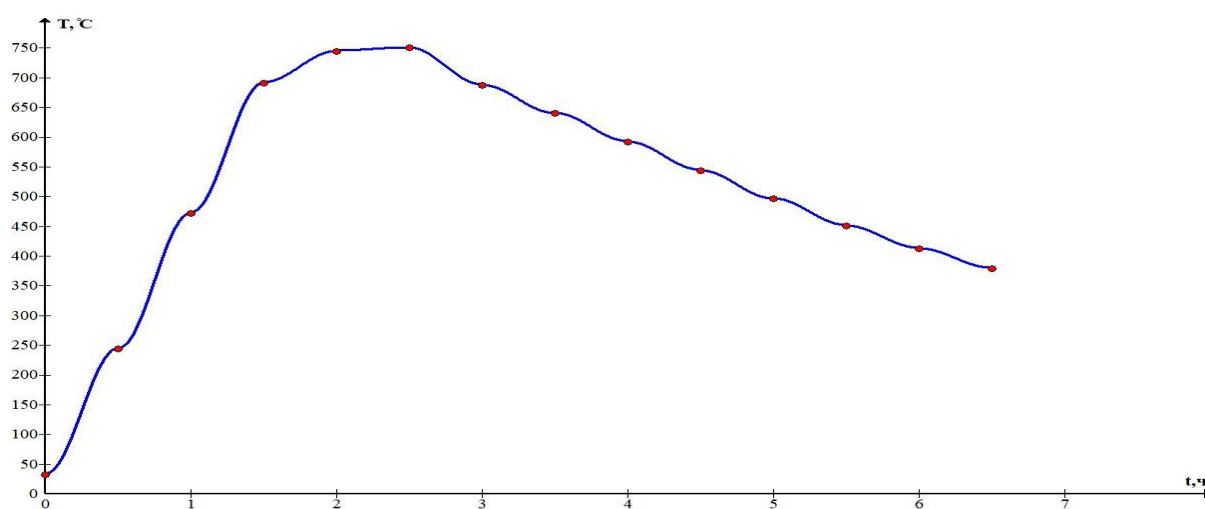


Рисунок 2.14 – Термический цикл опыта №1

Опыт № 2, нагрев печи проводился до 750 °С, выдержка при той же температуре длительностью в 30 минут, скорость охлаждения 100 °С/ч с температуры 750 °С до 400 °С, далее охлаждение с печью график показан на рисунке 2.15.

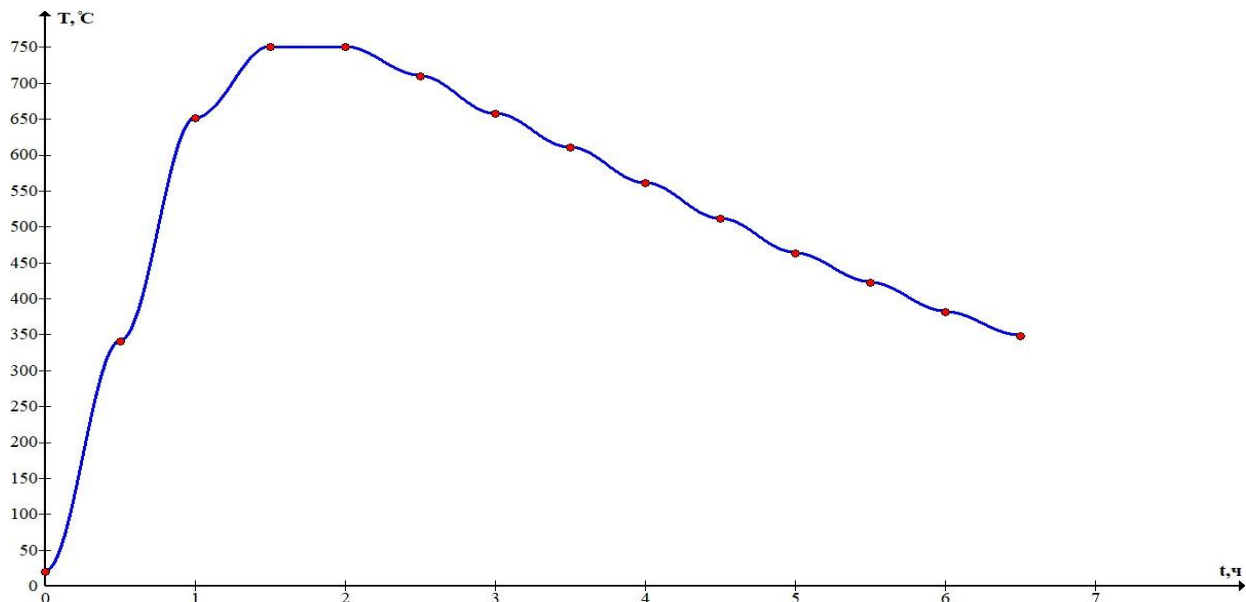


Рисунок 2.15 - Термический цикл опыта №2

Опыт № 3, Нагрев печи до 750 °С, выдержка при 750 °С длительностью 30 минут, охлаждение со скоростью 100 °С/ч с температуры 750 °С до 400 °С далее произвольно с печью, особенность этого опыта в том, что было добавлена вода в количестве 8 грамм внутрь контейнера, график представлен на рисунке 2.16.

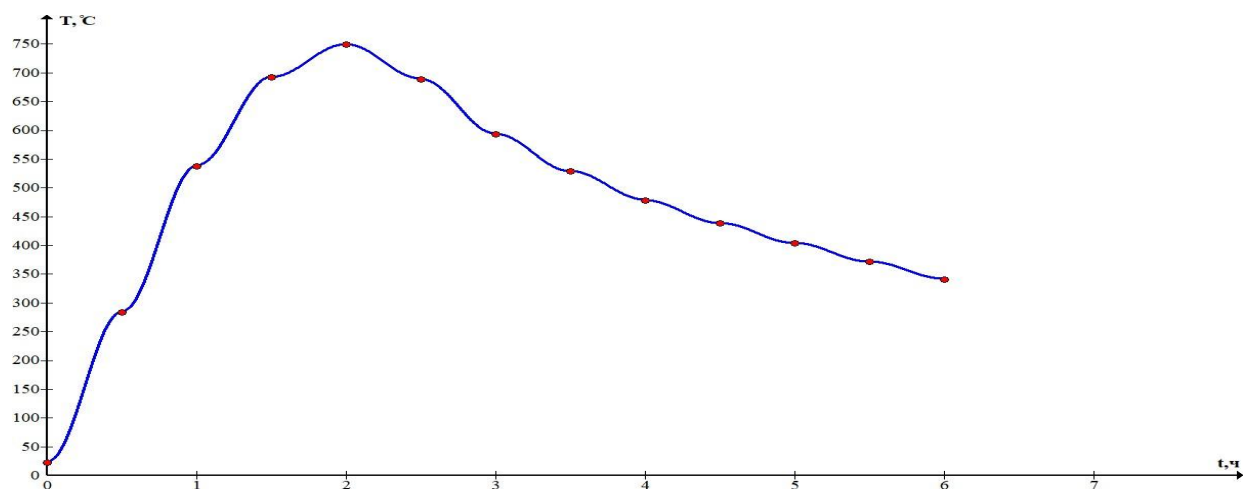


Рисунок 2.16 - Термический цикл опыта №3

Опыт № 4, нагрев печи опускался и не замерялся, замеры производились после загрузки контейнера в печь. Нагрев печи до 750 °С, выдержка при 750 °С составляла 30 минут, далее контролируемое охлаждение со скоростью 100 °С/ч до 400 °С, после произвольное охлаждение с печью график представлен на рисунке 2.17.

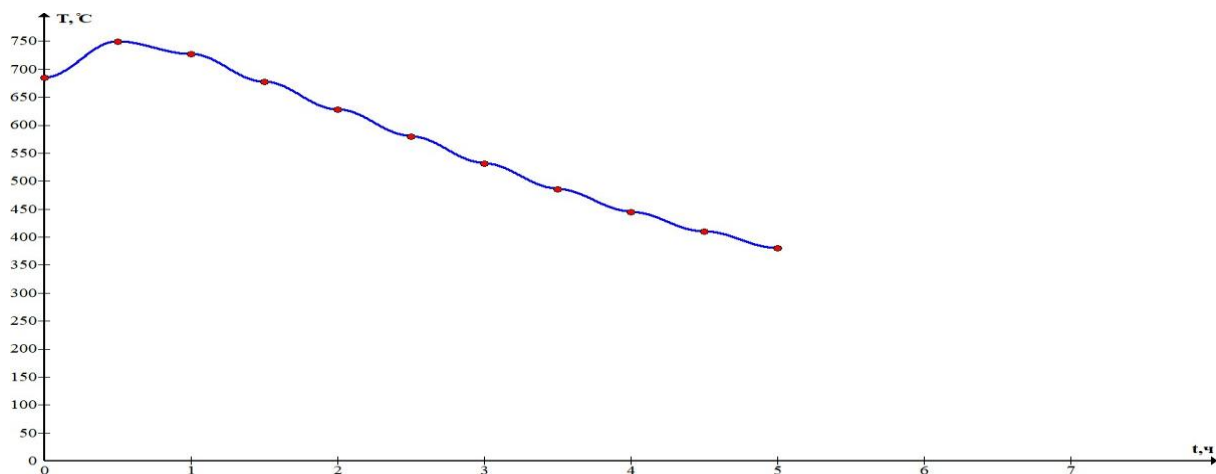


Рисунок 2.17 - Термический цикл опыта №4

Опыт № 5, в данном опыте был заменен старый прокаленный песок, на новый прокаленный, замер температуры велся после загрузки контейнера в печь. Нагрев до 750 °С, выдержка при данной температуре 30 минут, после контролируемое охлаждение со скоростью 100 °С/ч до 400 °С, далее охлаждение с печью. График приведён на рисунке 2.18.

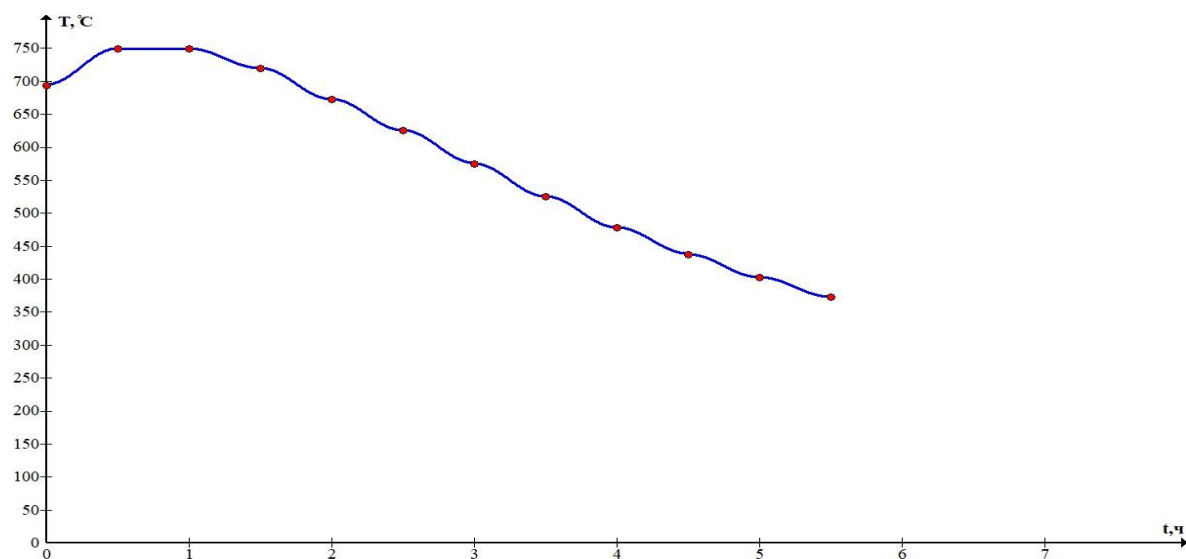


Рисунок 2.18 - Термический цикл опыта №5

### 2.3 Анализ полученных результатов отжига

После проведения ряда испытаний стало понятно, что есть недочёты, предположения о новых параметрах были выдвинуты после получения макрошлифов, а так же пластины после опытов 2 и 3 не обладали пластичностью и были очень хрупкие, опыты 1, 4 и 5 тоже были хрупкими, но не настолько как 2 и 3.



Рисунок 2.19 – Магнитострикционные пластины после отжига

Были получены микро- и макрошлифы для сравнительного анализа, для сравнения было выбрано четыре направления для дальнейшего сравнения

между собой и изученной литературы. Как стало понятно из анализа литературы, если пластины после отжига имеет хорошую пластичность, то отжиг можно считать успешно проведенным, но, тем не менее, для полноты данных необходимо проводить измерения магнитных свойств. К сожалению, такой возможностью обладает только заказчик и поэтому основными ориентирами служили пластичность, образование необходимой структуры и образование сплошной оксидной плёнки.

Для сравнения образцов было выбрано 4 вида пластин и их структур:

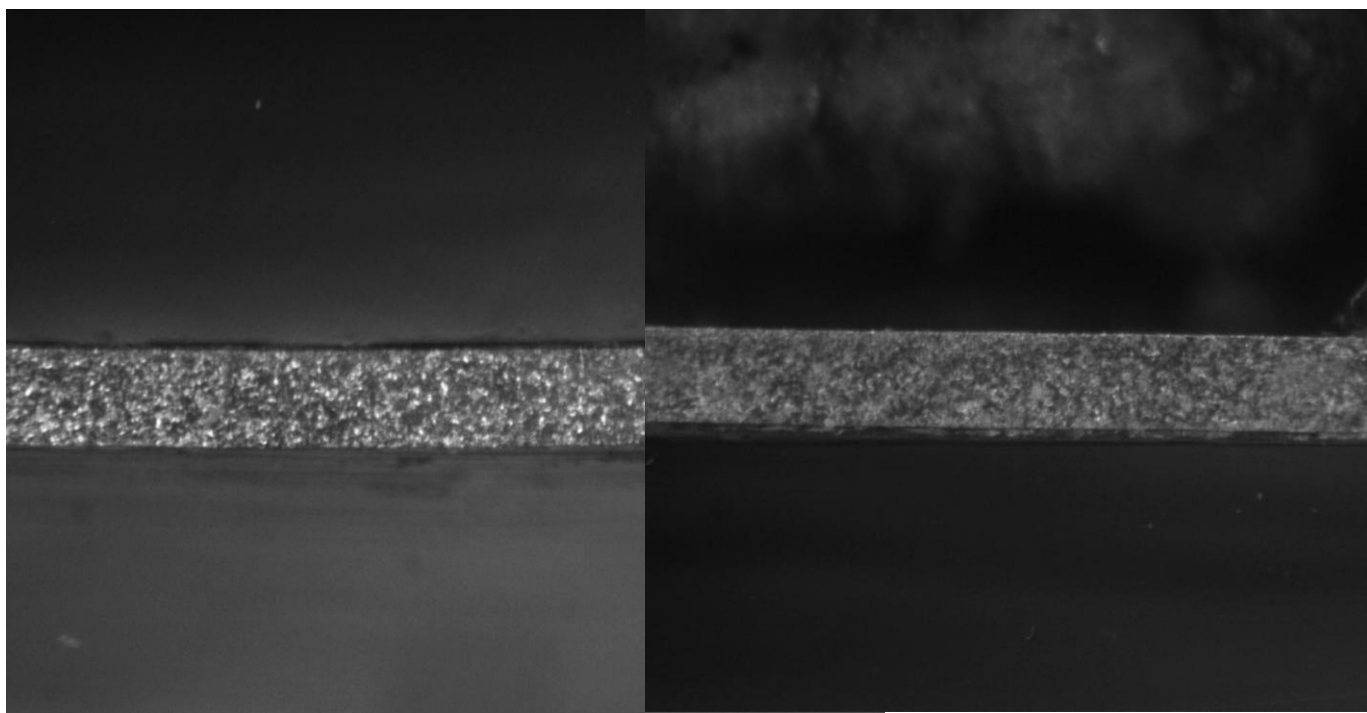
1. Структура не отожжённых пластин;
2. Структура пластин после отжига при 750 °С, выдержка 30 минут, охлаждение со скоростью 100 °С/ч до 400 °С, далее произвольно с печью;
3. Структура пластин после отжига при 820 °С в низком вакууме с остаточным давлением  $10^{-2}$ ;
4. Структура пластин после отжига 950 °С, выдержка 10 минут, охлаждение со скоростью 100 °С/ч до 400 °С, далее произвольно с печью;

Таким образом, сравнивались пластины: до отжига, после экспериментального отжига описанного в предыдущем подразделе, пластины отожжённые в низком вакууме и пластины экспериментального отжига по рекомендациям бакалаврской работы.

Пластинки для шлифов вырезались продольные и поперечные, после чего тщательно зачищались и заливались эпоксидной смолой.

По первому взгляду на макрошлифы можно понять, что для получения оптимальных результатов необходимо стремиться к мелкозернистой структуре как на рисунке 2.22. Благодаря рисунку 2.24 можно понять, что следует избегать чрезмерно высоких температур. Следовательно необходимо менять параметры режима при 750 °С рисунок 2.21, так как по сравнению с не отожжёнными пластинами рисунок 2.20 зёрна структуры меньше. Также необходимо провести сравнительный анализ микрошлифов, после чего будет

описан действующий режим термообработки. Далее будут представлены фотографии полученных макрошлифов.

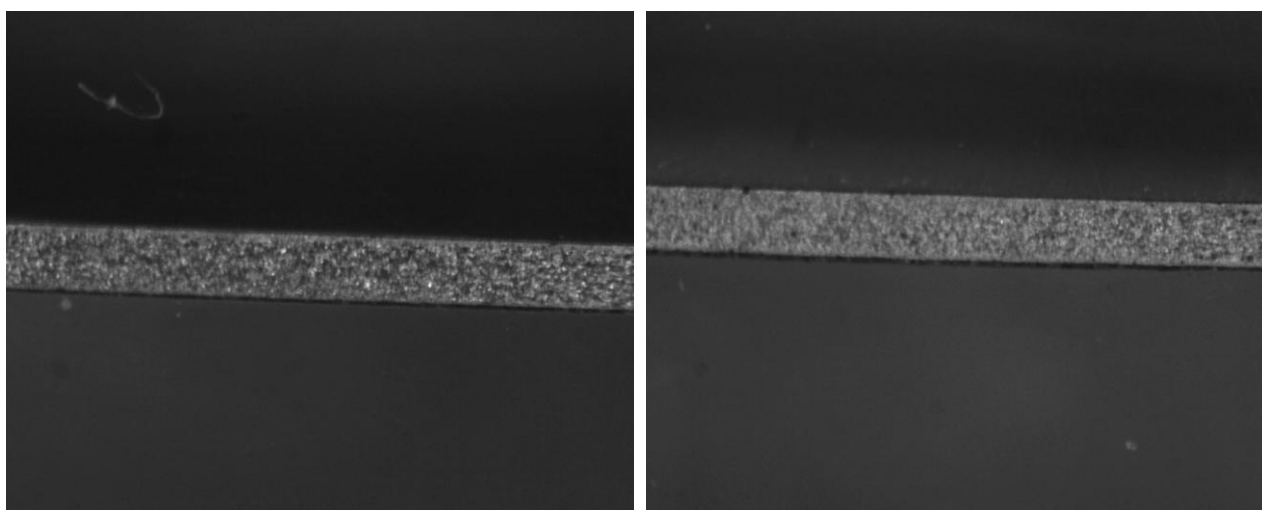


А

Б

А – продольный, Б - поперечный

Рисунок 2.20 – Макрошлифы не отожженных пластин

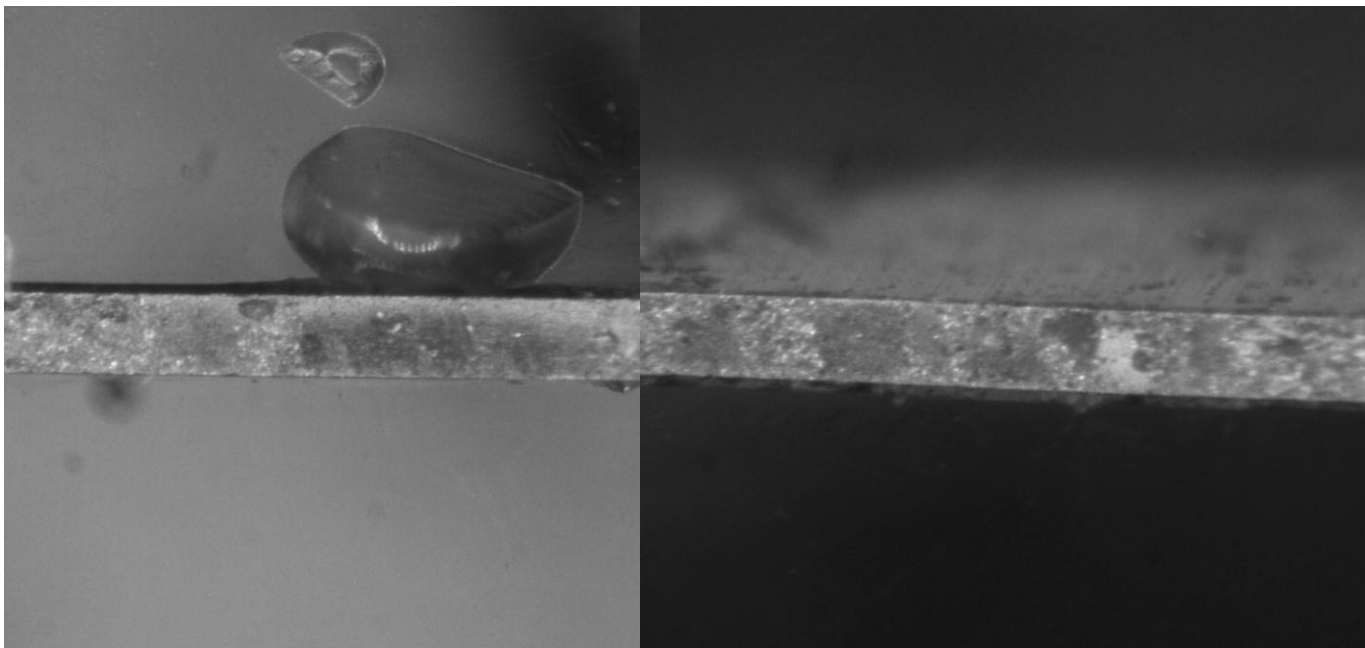


А

Б

А – продольный, Б - поперечный

Рисунок 2.21 – Макрошлифы отожженных пластин при 750 °С

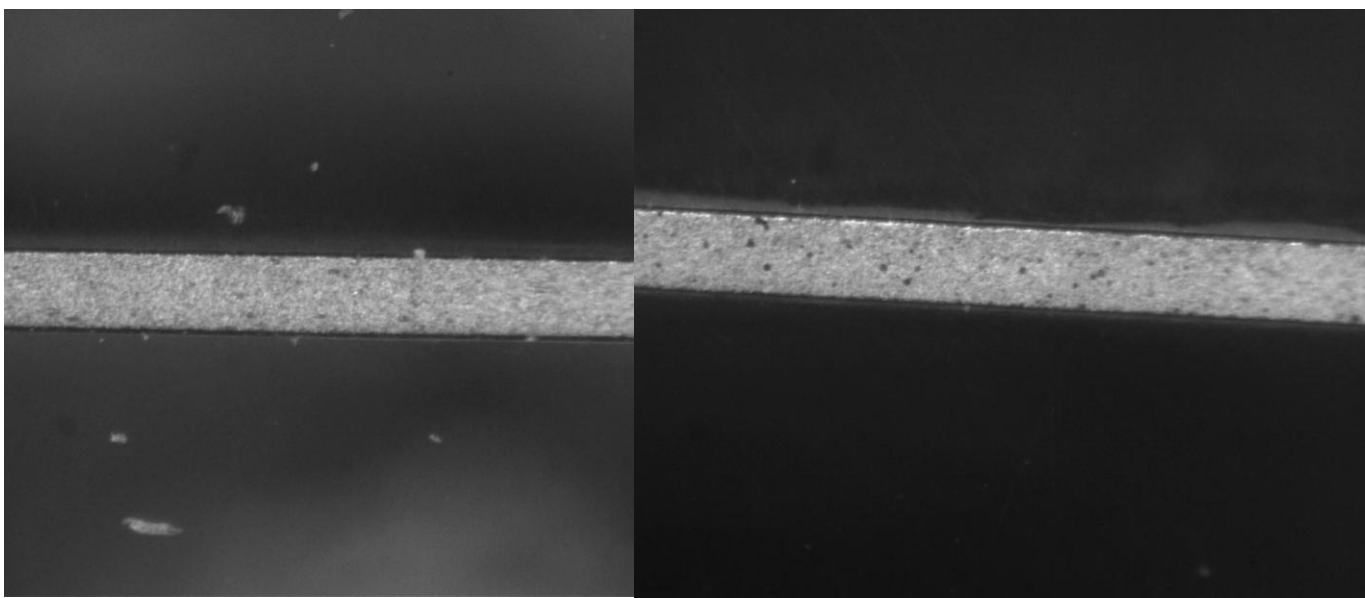


А

Б

А – продольный, Б - поперечный

Рисунок 2.22 – Макрошлифы отожженных пластин при 820 °С в низком вакууме



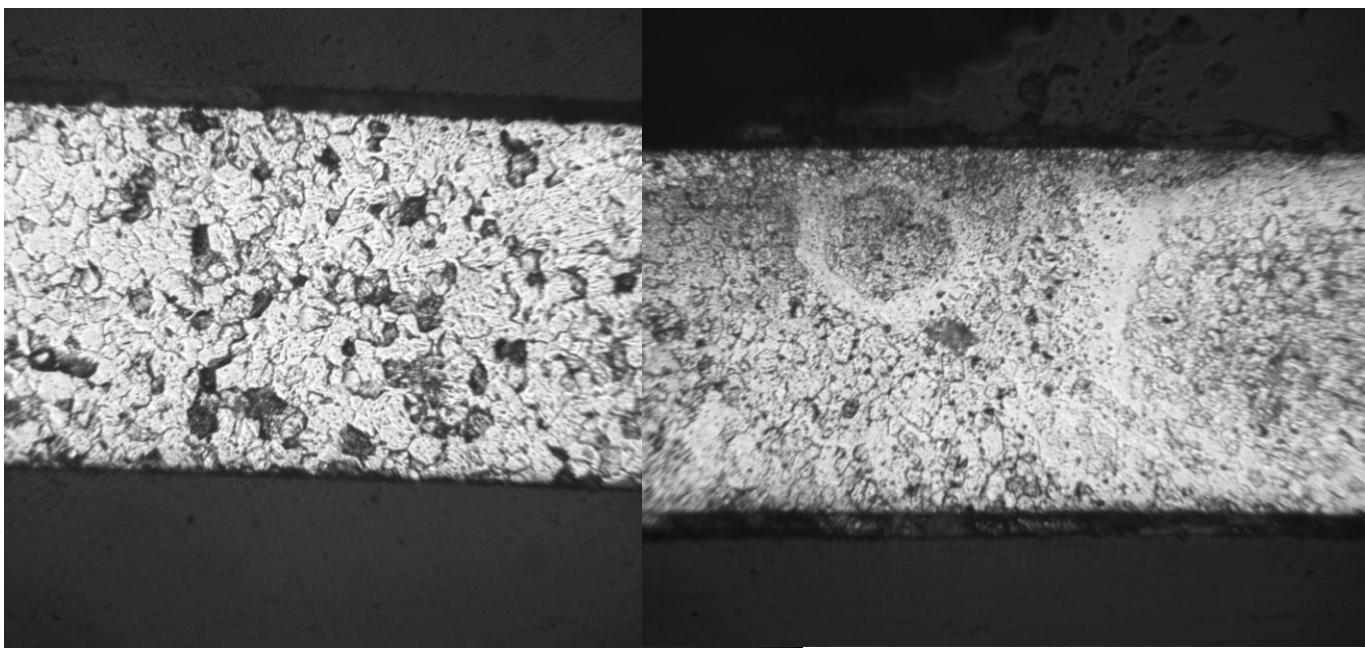
А

Б

А – продольный, Б - поперечный

Рисунок 2.23 – Макрошлифы отожженных пластин при 950 °С



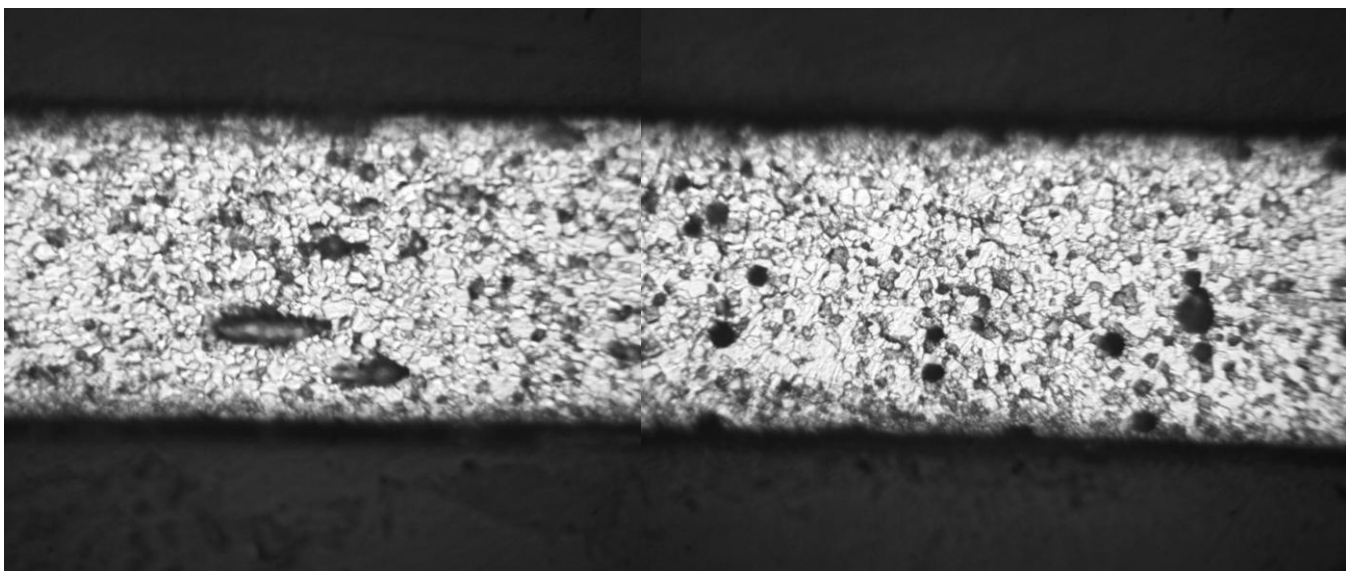


А

Б

А – продольный, Б - поперечный

Рисунок 2.24 – Микрошлифы не отожженных пластин

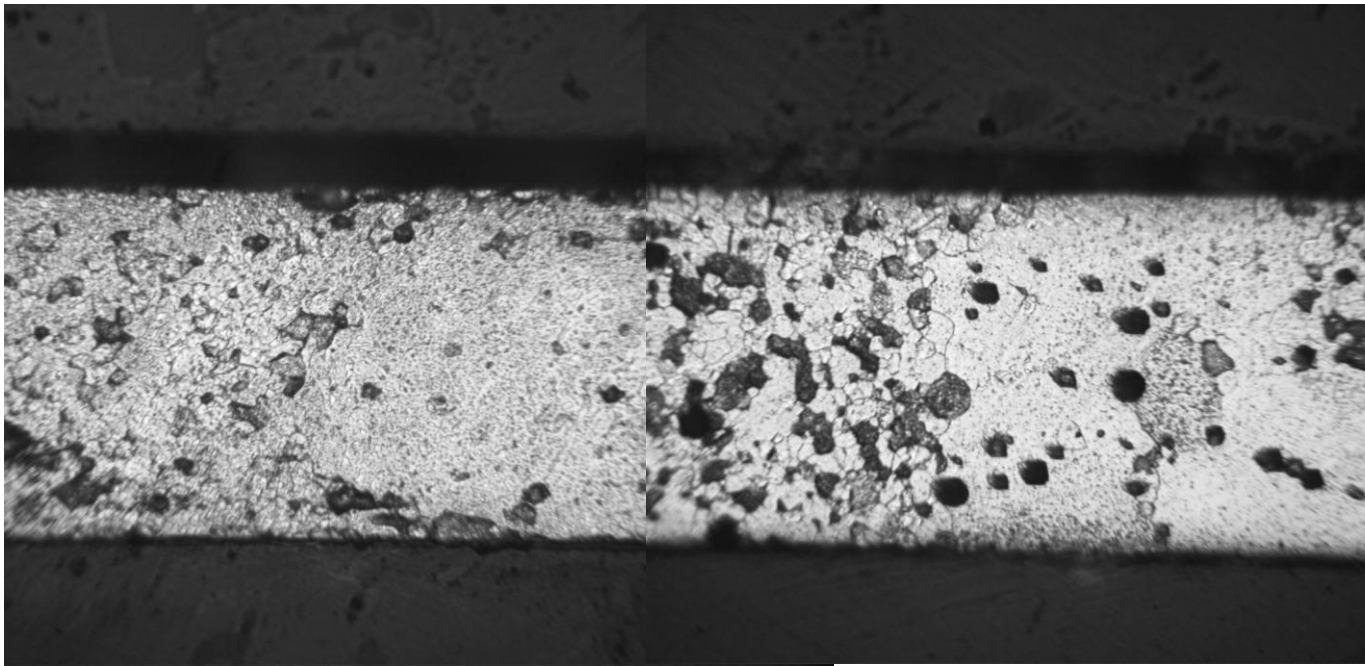


А

Б

А – продольный, Б - поперечный

Рисунок 2.25 – Микрошлифы отожженных пластин при 750 °С

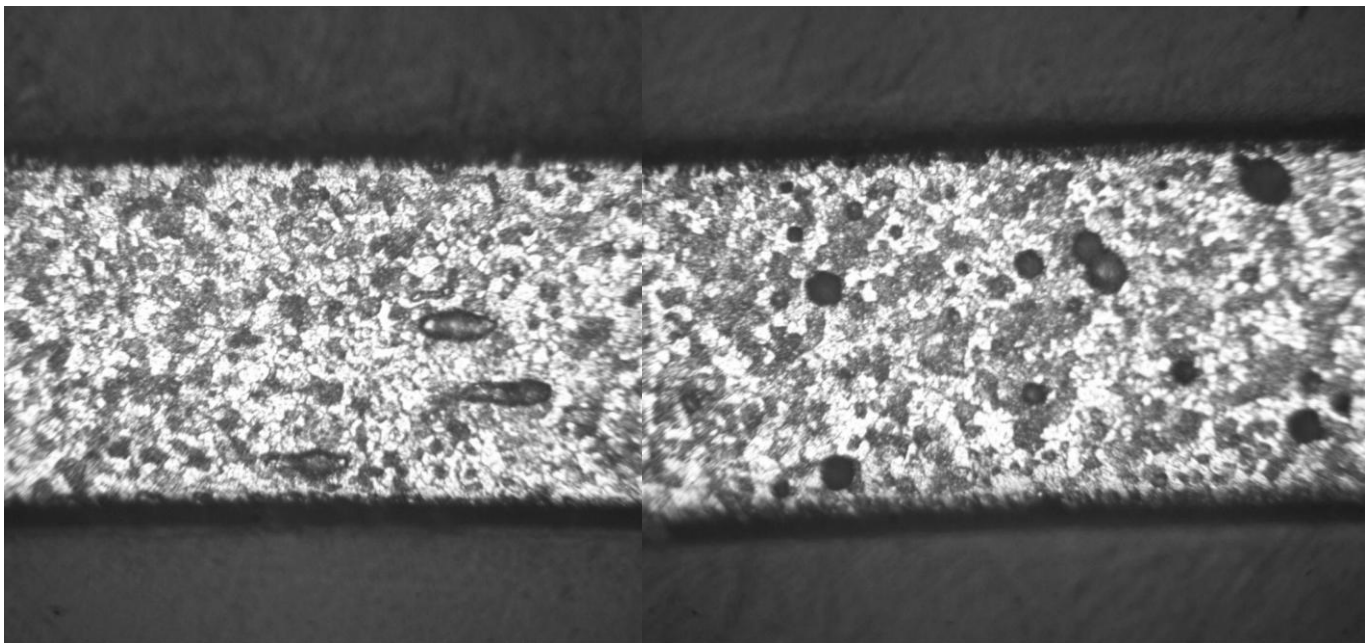


А

Б

А – продольный, Б - поперечный

Рисунок 2.26 – Микрошлифы отожженных пластин при 820 °С в низком вакууме



А

Б

А – продольный, Б - поперечный

Рисунок 2.27 – Микрошлифы отожженных пластин при 950 °С

Сравнительный анализ микрошлифов показанных на рисунках 2.24, 2.25, 2.26 и 2.27 позволил сделать выводы о том, какие параметры необходимо корректировать, что бы решить проблему охрупчивания и провести успешный отжиг магнестрикционных пластин.

Данными параметрами оказались длительность выдержки и скорость охлаждения, было принято решение увеличить время выдержки до 60 минут, а скорость контролируемого охлаждения снизить до 50 °С/ч. Данные изменения позволили сформировать более оптимальную структуру, а именно уменьшить зёрна структуры.

Таким образом, результатом исследования возможности термической обработки являются следующие параметры режима отжига. Нагрев печи до 750 °С, выдержка при 750 °С 60 минут, охлаждение со скоростью 50 °С/ч с температуры 750 °С до 400 °С, далее произвольное охлаждения с печью. После ряда таких испытаний во всех случаях пластины стали менее хрупкими и поддаются пластическим деформациям, следовательно, опираясь на литературную базу, можно предположить, что вместе с механическими свойствами улучшились и магнитные, но для подтверждения этих слов необходимы испытания магнитных свойств. К сожалению, из-за отсутствия необходимого оборудования и методик проведения испытаний, данная проверка остаётся за заказчиком.

Но были проведены замеры электрического сопротивления отожженных пластин, а также была составлена сравнительная таблица отожженных и не отожженных пластин. Использовались пластины со всех отжигов, что представляли более успешный результат.

Для снятия показаний электросопротивления использовался мост постоянного тока М0-62 класс 0,1, данное оборудование представлено на рисунке 2.29.

Пластины зажимались в «замерительной зоне» после чего подавалось напряжение, величина которого регулировалось, рисунок 2.30.



Рисунок 2.28 – Магнитострикционные пластины после скорректированного режима термообработки

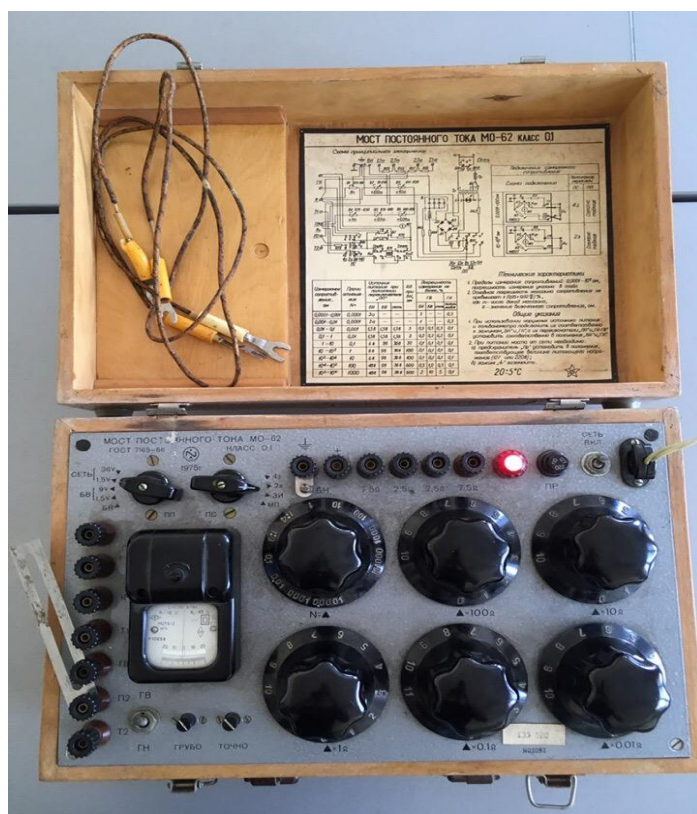


Рисунок 2.29 – Мост постоянного тока М0-62 класс 0,1,



Рисунок 2.30 – Процесс снятия показаний электросопротивления

Таблица 2.1 – Результат измерений электросопротивления

Значения не отожженных пластин, МОм	Значения отожженных пластин, МОм
$54,9 \cdot 10^{-4}$	$706,9 \cdot 10^{-4}$
$52,3 \cdot 10^{-4}$	$20,2 \cdot 10^{-4}$
$47,8 \cdot 10^{-4}$	$56,4 \cdot 10^{-4}$
$55,7 \cdot 10^{-4}$	$203,2 \cdot 10^{-4}$
$47,6 \cdot 10^{-4}$	$312,2 \cdot 10^{-4}$
$49,9 \cdot 10^{-4}$	0,28
$48,9 \cdot 10^{-4}$	$324,2 \cdot 10^{-4}$
$55,7 \cdot 10^{-4}$	$425,9 \cdot 10^{-4}$
$62,9 \cdot 10^{-4}$	$49,61 \cdot 10^{-4}$
$49,2 \cdot 10^{-4}$	$46,3 \cdot 10^{-4}$

Продолжение таблицы 2.1- Результат измерений электросопротивления

Значения не отожженных пластин, МОм	Значения отожженных пластин, МОм
$50,8 \cdot 10^{-4}$	$109,5 \cdot 10^{-4}$
$55,6 \cdot 10^{-4}$	$69,7 \cdot 10^{-4}$
$52,5 \cdot 10^{-4}$	$67,9 \cdot 10^{-4}$
$47,7 \cdot 10^{-4}$	$61,5 \cdot 10^{-4}$
$48,9 \cdot 10^{-4}$	$63,7 \cdot 10^{-4}$
$54,9 \cdot 10^{-4}$	$135,2 \cdot 10^{-4}$
$49,9 \cdot 10^{-4}$	$53,7 \cdot 10^{-4}$
$47,7 \cdot 10^{-4}$	$58,8 \cdot 10^{-4}$
$53,7 \cdot 10^{-4}$	$89,6 \cdot 10^{-4}$
$49,6 \cdot 10^{-4}$	$183,3 \cdot 10^{-4}$
$52,2 \cdot 10^{-4}$	$156,6 \cdot 10^{-4}$

Проведя анализ полученных данных можно заметить как выпадающие значения, так вполне и приемлемые из данной таблицы следует, что оксидирование происходит. Местами разница превышает увеличение сопротивления отожжённых пластин перед не отожжёнными более, чем в 10 раз.

### **3 Исследование возможностей пайки и совмещения**

#### **3.1 Методика проведение экспериментальной пайки в печи**

Так как исследование возможности пайки проводилась в том же месте где и исследования возможности термической обработки, методика и оборудование практически схожи. Различия, заключаются в проводимых операциях и используемых инструментах.

Порядок проведения опыта для всех случаев в основном был един и описан ниже.

Сначала включалась лабораторная электропечь сопротивления, и выставлялись режимы, параллельно нагреву электропечи шла подготовка материалов и контейнера к пайке и отжигу.

В качестве образца использовалась пластинка стали, так как переходник, с которым необходимо паять, магнитоотрицательный пакет тоже изготовлен из стали. На рисунках 3.1, 3.2 представлен метод получения данных пластин.



Рисунок 3.1 – Подготовительный этап

Заготовка вырезалась из листовой стали толщиной 0,5 мм, по форме подгонялась под пайку с магнитоотрицательными пластинами так, чтобы

была возможность уложить припой и была площадка под образования галтелей.



Рисунок 3.2 – Подготовительный этап

После вырезки заготовки, на очереди была операция зачистки, наждачной бумагой зачищались контейнер, припой в данном исследовании использовались латунный и медные припой, а также стальные заготовки и магнитоотрицательные пластины.



Рисунок 3.3 – Зачистка поверхностей

После механической обработки следовало обезжиривание паяемых материалов, для обезжиривания использовался ацетон и техническая вата.





Рисунок 3.4 – Обезжиривание паяемых поверхностей

Как поверхности были готовы, производилась сборка в струбцину, сначала укладывалась стальная пластинка на один из краев струбцины после латунный припой, затем магнитоотрицательная пластина, опять латунный припой и магнитоотрицательная пластина и последним укладывался медный пруток припоя со стороны торца полученного путём укладки материалов друг на друга. После укладки всех материалов в струбцину, струбцины стягивались болтами так, чтобы материалы плотно прижимались и в тоже время были зазоры для затекания припоев.

На рисунках 3.5, 3.6 и 3.7 показано поэтапно то, что было описано выше. После подготовки струбцины следовала подготовка контейнера, примерно, как и при подготовке к отжигу, но с небольшим отличием.



Рисунок 3.5 – Укладка припоя между стальной и магнитострикционной пластиной



Рисунок 3.6 - Укладка припоя между магнитострикционными пластинами



Рисунок 3.7 – Готовая к пайке струбцина

Различие между подготовками заключается в том, что необходимо аккуратно уложить струбцину не повредив целостность готовой конструкции, а так же не забыть гранулы цинка.



Рисунок 3.8 – Сборка контейнера

Остальная сборка происходила в том же порядке что и при подготовке к отжигу, аккуратно устанавливалась термопара, после чего всё закрывалось крышкой, пропорции песка и древесноугольного карбюратора такие же как и при термической обработке, главное обеспечить максимальную герметичность.



Рисунок 3.9 – Готовый к загрузке контейнер

После окончания подготовительных операций необходимо дождаться пока электропечь достигнет заданной температуры и собственно загрузить контейнер в печь.

### **3.2 Экспериментальные данные опытов по пайке**

Так как одна из задач данной работы это проверка возможности совмещения процессов отжига и пайки, то и опыты проводились исходя из данной задачи, также проводились опыты и обычной пайки, но их графики не несут в себе особой информации. Но всё же будут описаны словесно, так же

как и представлены их результаты. Для удобства будет введена нумерация, как и в прошлой главе.

Опыт № 1, нагрев электропечи до 950 °С, выдержка для проведения пайки 10 минут, охлаждение до 750 °С выдержка для проведения отжига 60 минут, охлаждение со скоростью 50 °С/ч с температуры 750 °С до 400 °С, далее произвольное охлаждение с печью. Данный опыт проходил без припоев и паров цинка для того чтобы посмотреть на поведение пластин после такого цикла график представлен на рисунке 3.10.

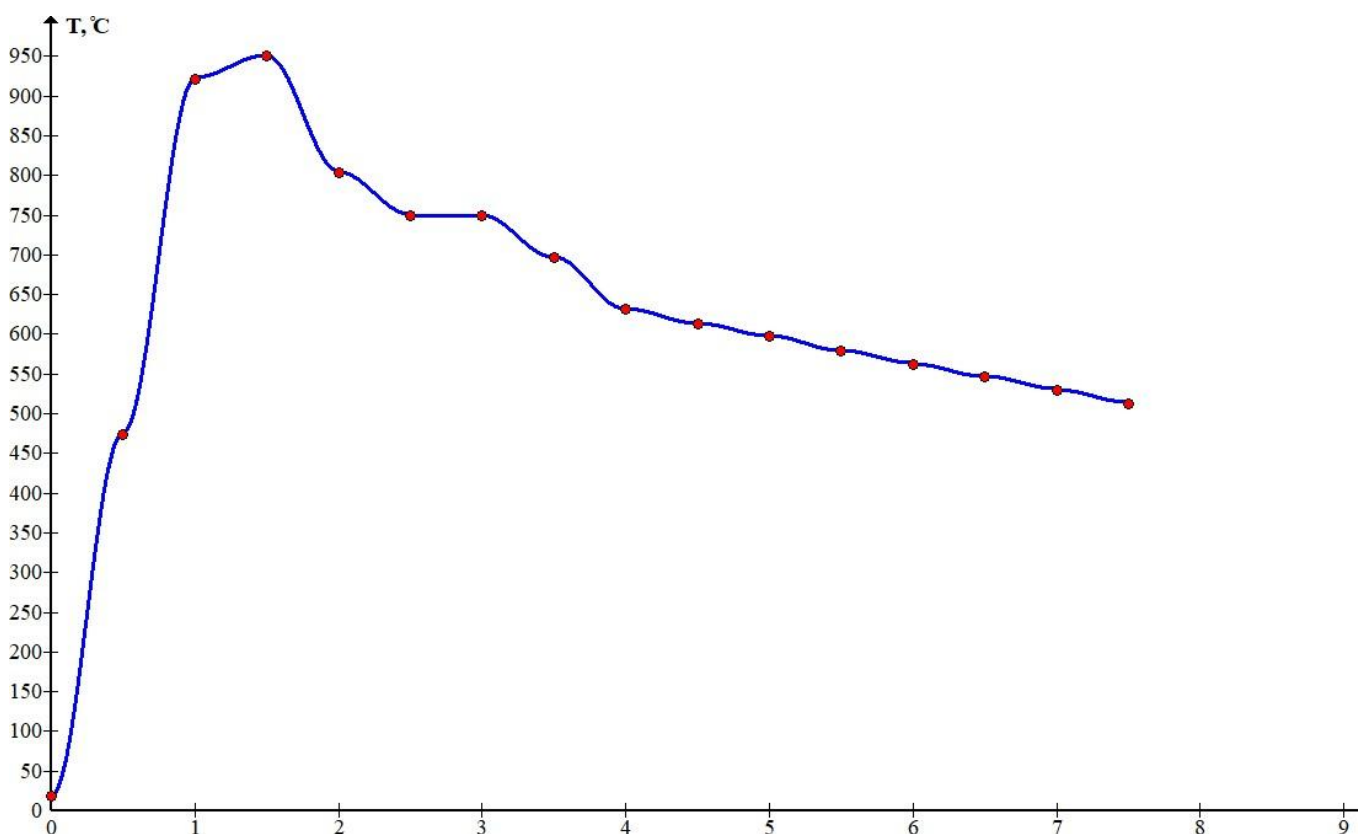


Рисунок 3.10– Термический цикл совмещённых процессов опыта №1

Опыт № 2, нагрев электропечи до 950 °С, выдержка при данной температуре 10 минут, охлаждение до 750 °С выдержка при данной температуре 60 минут, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 400 °С далее произвольно с печью. В этом опыте использовался латунный припой и пары цинка. Замеры велись после загрузки контейнера, также опустились замеры охлаждения так как их динамика уже известна график представлен на рисунке 3.11.

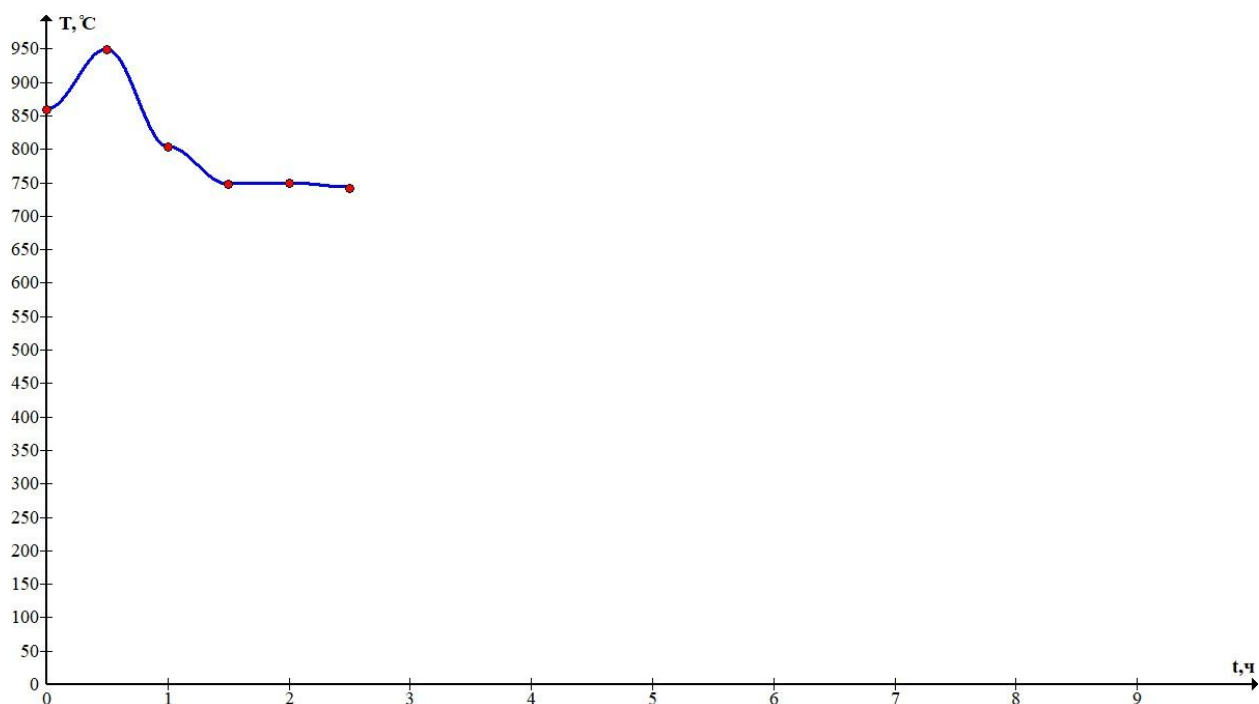


Рисунок 3.11- Термический цикл совмещённых процессов опыта №2

Опыт № 3, замер температуры вёлся после загрузки контейнера в печь, запись охлаждения также не производилась так, как динамика охлаждения известна. Нагрев велся до 950 °C выдержка 10 минут, охлаждение до 750 °C выдержка 60 минут, охлаждение 50 °C/ч с температуры 750 °C до 400 °C. В данном опыте использовались латунный и медный припой, а также пары цинка. График приведён на рисунке 3.12.

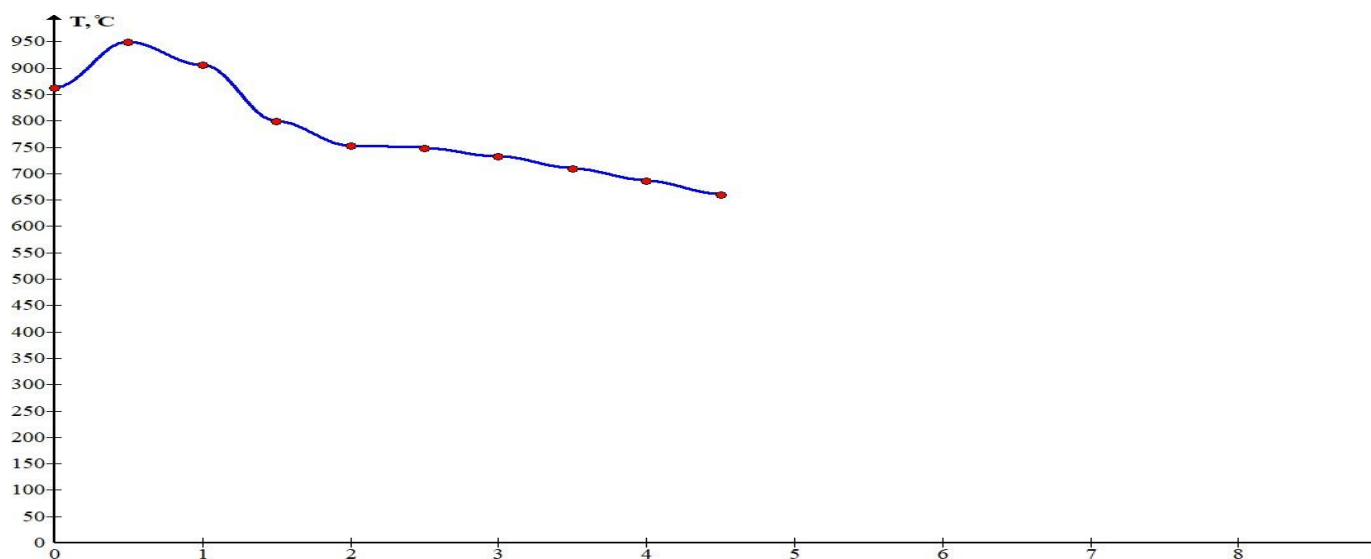


Рисунок 3.12- Термический цикл совмещённых процессов опыта №3

### 3.3 Анализ полученных результатов пайки

После проведения экспериментальных опытов по совмещению, были проведены опыты исключительно по пайке, их режим заключался в нагреве печи до 950 °С после чего загружался контейнер, затем после того как температура внутри контейнера доходила до 950 °С начиналась выдержка 10 минут, по завершению электропечь отключалась, а контейнер остывал на воздухе.

Далее представлены результаты пайки в виде фотографий, после чего будут подведены итоги.



Рисунок 3.13– Результаты опыта №2

Не учитывая, что струбцина спаялась с обрабатываемыми материалами, опыт завершился успешно, пайка произошла, магнестрикционные пластины отожджены, но для большего понимания необходимы шлифы и испытания на разрыв, к сожалению, из-за постоянного спаивания струбцины с образцами, добиться необходимых данных не получилось.

Далее будут показаны результаты пайки без совмещения, то есть материалы не подвергались чрезмерному влиянию высоких температур длительное время. Результаты представлены на рисунках 3.14, 3.15, 3.16 и 3.17.

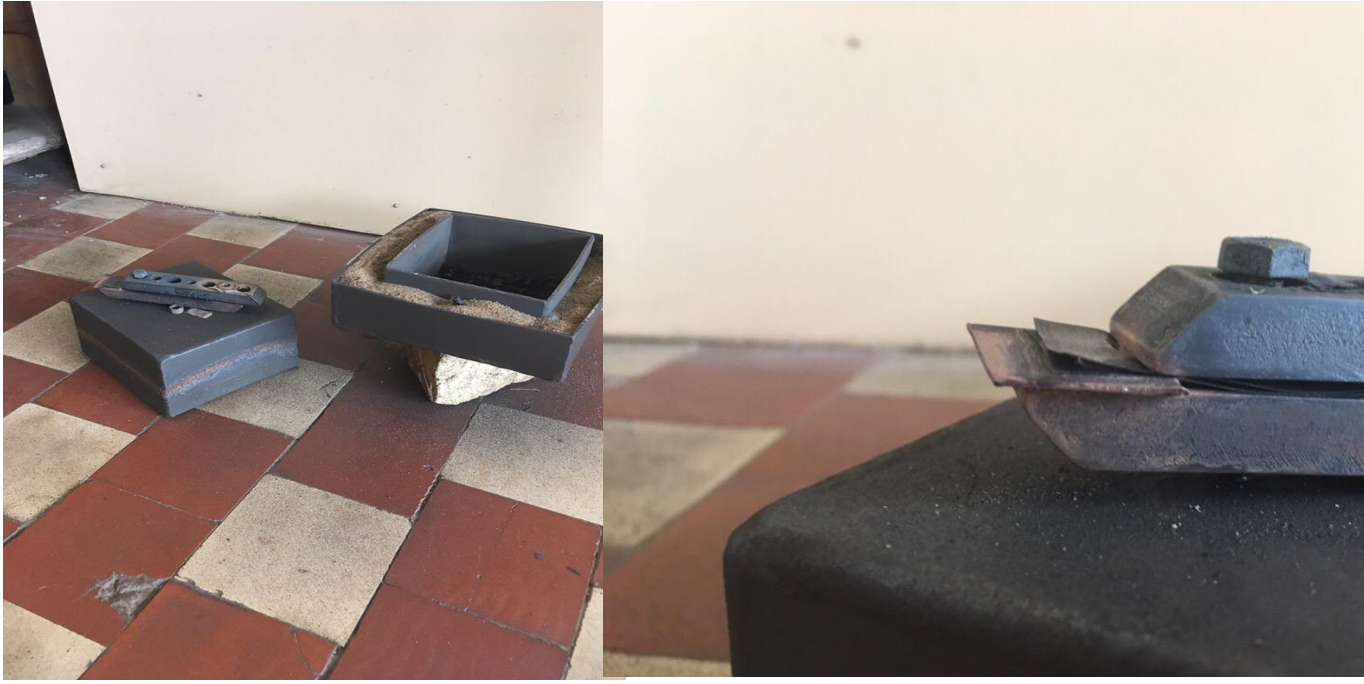


Рисунок 3.14– Результаты пайки без совмещения



Рисунок 3.15– Результаты пайки без совмещения





Рисунок 3.16– Пайка с использованием обмазки мелом струбцин



Рисунок 3.17– Результаты пайки с использованием обмазки мелом струбцин

Мел призванный решить проблемы спаивания струбцины с паяемыми материалами помог на половину, то есть одна сторона струбцины перестала спаиваться, а вот вторая нет.

Ввиду сложившихся обстоятельств не было возможности получить макро- и микрошлифы, а также произвести испытания на разрыв. После каждого опыта пайки приходилось распаивать данное соединение.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведения работы на тему «Исследования возможностей пайки и термической обработки магнитострикционных материалов» был проведён ряд экспериментальных опытов направленных на проверку возможностей термической обработки и пайки магнитомягкого сплава 49К2ФА в лабораторной электропечи сопротивления с контролируемой атмосферой.

В ходе экспериментальных опытов, был разработан режим термической обработки сплава пермендюр, который после отжига обладал хорошей пластичностью, данный результат свидетельствует о получение оптимальной структуры после отжига. Из литературы и других работ на схожую тематику в теории следует, что при получении хорошей пластичности, отожженные пластины обладают и хорошими магнитными свойствами.

Также был проведён замер электросопротивления отожженных пластин сплава 49К2ФА, что подтвердило наличие оксидной плёнки на отожженных образцах, значение некоторых из которых превосходили не отожженные образцы более чем в 10 раз.

Так как проверка магнитных свойств в месте проведения исследования оказалась невозможной, то полученные результаты необходимо проверить с помощью заказчика.

Была разработана технология и проведены опыты по проверке возможности пайки магнитострикционных пластин со сталью с использованием печной пайки, результаты показывают, что такая пайка является возможной. Но для получения дополнительных результатов необходимо получить макро- и микрошлифы паяного соединения, а также провести испытания на разрыв. Из-за невозможности разработать новое приспособление в месте проведения исследования, дополнительные данные получить не удалось, так как паяемые материал спаивался с

приспособлением. Были предприняты попытки предотвратить процесс спаивания материалов с приспособлением, но безуспешно.

Таким образом, для проведения пайки в электропечи сопротивления с контролируемой атмосферой необходимо разработать подходящие приспособление.

Также были проведены исследования по возможности объединения данных технологических операций в один термический цикл, но так как проблему со спаиванием материалов с приспособлением не удалось решить, невозможно проверить структуру получаемых образцов, но сам факт возможности подтверждён, хоть и требует дополнительных испытаний.

Благодаря решению поставленных задач, представляется возможным достичь цели, но необходимо провести дополнительные испытания по проверке ряда параметров, возможность данных операций подтверждена, а результаты имеют перспективу.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Холопов, Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов / Ю.В. Холопов. – Л. : Машиностроение, 1988. – 224 с.
2. Зайцев, К.И. Сварка полимерных материалов / К.И. Зайцев, Л.Н. Мацюк. – М. : Машиностроение, 1988 – 312 с.
3. Донской, А.В. Ультразвуковые электротехнологические установки / А.В. Донской, О.К. Келлер, Г.С. Кратыш. – Л. : Энергоиздат. 1982. – 208 с.
4. Энциклопедия физики и техники – [электронный ресурс] – URL: [http://femto.com.ua/articles/part\\_1/2111.html](http://femto.com.ua/articles/part_1/2111.html) (дата обращения: 31.05.2019).
5. Магнитострикционные преобразователи – [электронный ресурс] – URL: [http://beznakipi.com/ru/acoustic-t/magnetostrictive\\_transducers](http://beznakipi.com/ru/acoustic-t/magnetostrictive_transducers) (дата обращения: 31.05.2019).
6. Мишин, Д.Д. Магнитные материалы / Д.Д. Мишин – М. : Высшая школа, 1991. – 384 с.
7. Кекало, И.Б. Физическое металловедение прецизионных сплавов / И.Б. Кекало, Б.А. Самарин - М. : «Металлургия», 1989. - 496 с.
8. ГОСТ 10160-75. Сплавы прецизионные магнито-мягкие. – Введ. 1976 – 01 – 01. – М. : Изд-во стандартов, 2004. – 47с.
9. Карабасов, Ю.С. Новые материалы / Ю.С. Карабасов. – М. : «МИСИС», 2002. – 736 с.
10. Гудремон, Э. Специальные стали / Э. Гудремон ; пер. с нем. М.Л. Берштейна и В.С. Меськина, науч. Ред А.С. Займовский. – М : «Металлургия», 1966. – 1245 с.
11. Молотилов, Б.В. Прецизионные сплавы / Б.В. Молотилов [и др.]. – М : «Металлургия», 1974. – 448 с.
12. Чижов, А.В. Измерение параметров материалов магнитных систем высокомоментных двигателей : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн.

- наук : 05.11.01 : защищена 22.04.15 / Чижов Андрей Вячеславович. – П., 2015. – 140 с.
13. Пшеченкова, Г.В. Прецизионные сплавы / Г.В. Пшеченкова, Т.В. Краснопевцева // Металлургиздат, 1956. – 9 с.
14. Пат. 589265 СССР, МПК С 21 D 1/74. Способ термической обработки железо-кобальтовых сплавов / В.Н. Букарев, В.П. Перфилова (СССР). – № 2374054/22-02 ; заявл. 14.06.76 ; опубл. 25.01.78, Бюл. № 3. – 4 с.
15. DOAJ (Directory of Open Access Journals). – URL: <https://doaj.org/article/c3e4e2fd74a5438eae0edfe77d0141ad/> (Дата обращения 10.05.2018).
16. ACADEMIA. – URL: [https://www.academia.edu/31221555/Electron\\_microscopy\\_study\\_on\\_grain\\_boundary\\_characterizations\\_of\\_Fe\\_Co\\_V\\_alloy\\_during\\_annealing/](https://www.academia.edu/31221555/Electron_microscopy_study_on_grain_boundary_characterizations_of_Fe_Co_V_alloy_during_annealing/) (Дата обращения 13.05.2018).
17. DOAJ (Directory of Open Access Journals). – URL: <https://doaj.org/article/49aec61b48284276979d3de9bbca3dea/> (Дата обращения 15.05.2018).
18. DOAJ (Directory of Open Access Journals). – URL: <https://doaj.org/article/2051a7d42bd7431d9cf34a8c5e13800b/> (Дата обращения 17.05.2018).
19. DOAJ (Directory of Open Access Journals). – URL: <https://doaj.org/article/dc4c2e6474dd4829b2a18d8a4312ebb4/> (Дата обращения 19.05.2018).
20. Ховришкин, Д.С. Исследование и разработка технологии изготовления магнотрикссионного преобразователя. Этап 1 : выпускная квалификационная работа: защищена 27.06.2017 / Ховришкин Дмитрий Сергеевич. – ТГУ. – Тольятти, 2017. – 55 с.
21. Нестеренко, И.С. Исследование и разработка технологии изготовления магнотрикссионного преобразователя. Этап 2 : выпускная

- квалификационная работа: защищена 27.06.2017 / Нестеренко Иван Сергеевич. – ТГУ. – Тольятти, 2017. – 60 с.
22. Ховришкин, Д.С. Термическая обработка магнитострикционных материалов / Д.С. Ховришкин, А.Ю. Краснопевцев // Сбор. науч. труд. – 2017. - № 13. – С. 93-96.
23. Краснопевцев, А.Ю. Пайка и термообработка при изготовлении магнитостриктора / Краснопевцев А.Ю, М.В. Сафонов, Д.Э. Советкин, Д.С. Ховришкин // Сбор. мат. международн. науч.-техн. конф. – 2018. – С. 295-296.
24. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М : Metallurgia, 1986. – 544 с.
25. Лашко, С.В. Пайка металлов / С.В. Лашко, Н.Ф. Лашко. – М. : Машиностроение, 1988. – 376 с.
26. Петрунин, И.Е. Справочник по пайке / И.Е. Петрунин [и др.]. – М. : Машиностроение, 2003. – 480 с.
27. Преображенский, А.А. Магнитные материалы и элементы / А.А. Преображенский, Е.Г. Бишард. – М. : Высш. шк, 1986. – 352 с.
28. Рейнбот, Г. Магнитные материалы и их применение / Г. Рейнбот; пер. с нем. Г.П. Лебедева, под ред. А.А. Преображенского. – Л. : Энергия, 1974. – 384 с.
29. Орлов, П.И. Основы конструирования / П.И. Орлов [и др.]. — М. : Машиностроение, 1977. – 360 с.
30. Амирджанова, И.Ю. Правила оформления выпускных квалификационных работ / И.Ю. Амирджанова [и др.]. – Тольятти : ТГУ, 2019, -145 с.
31. Куликович, Т.О. Основы научного цитирования / Т.О. Куликович. – Минск : БГУ, 2010. – 58 с.

32.Фёдоров, А.Л. Технология изготовления паяных конструкций / А.Л. Фёдоров, А.Ю. Краснопевцев, О.В. Шашкин. – Тольятти : ТГУ, 2013 – 60 с.