

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
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, специальности)

«Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического  
оборудования»

(направленность (профиль/специализация))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Исследование процесса формирования сварных соединений изделий  
из синтетических материалов ультразвуковой сваркой

Студент

Н.Г. Спиридонов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

д.т.н., доцент В.В. Ельцов

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

(личная подпись)

руководитель

Тольятти 2021

## Содержание

Введение.....	4
1 Технологические возможности применения ультразвуковой сварки в газонефтехимической отрасли.....	6
1.1 Анализ и перспективы применения пластиков в газонефтехимии .....	6
1.2 Анализ существующих методов сборки пластиковых изделий .....	13
1.3 Физические основы ультразвуковой сварки.....	19
1.4 Обзор технических решений в области ультразвуковой сварки .....	27
1.5 Анализ исследований, проведенных в области ультразвуковой сварки полимеров .....	32
2 Разработка методики и оборудования для проведения исследований .....	39
2.1 Описание объекта исследований.....	39
2.2 Проектирование установки для экспериментальных исследований .....	42
2.2.1 Проектирование и изготовление ультразвуковой колебательной системы .....	42
2.2.2 Проектирование ультразвукового генератора .....	50
2.3 Разработка методики исследования качества ультразвуковой сварке клапана адсорбера .....	52
3 Анализ результатов исследований .....	59
3.1 Анализ первичных результатов проведенных исследований .....	59
3.2 Доработка формы корпуса клапана.....	61
3.3 Анализ вторичных результатов проведенных исследований .....	62
4 Разработка комплекса для ультразвуковой сварки корпуса адсорбера.....	66
4.1 Проектирование привода для ультразвуковой сварки .....	66

4.2 Разработка технологического процесса ультразвуковой сборки адсорбера .....	70
Заключение .....	74
Список используемых источников.....	76

## Введение

На данный момент изделия из пластика все больше начинают применяться во многих сферах нашей жизнедеятельности и промышленности.

По данным независимой некоммерческой организации «Greenpeace в России» ежегодно во всем мире производится более 300 миллионов тонн пластиковых изделий. И в ближайшие двадцать лет этот показатель удвоится. Примерно половина из этого числа составляет одноразовая посуда и упаковка [23].

Согласно всемирной онлайн базе данных КI Polyglobe к середине 2018 года объем производства термопластов – самого большого и экономически значимого сегмента в сфере пластмасс – достиг порядка 337 миллионов тонн в год. При этом более 91 процента общего объема приходится на стандартные пластмассы, еще 8 процентов (примерно 27 миллионов тонн) – на технические термопласты, и оставшиеся доли процентов – на высокотехнологичные полимеры [18].

По прогнозам Европейской Ассоциации производителей пластиковых изделий Plastics Europe, объемы производства технических, или как их еще называют инженерных, и стандартных пластиковых изделий будут расти в среднем на 4 – 5 процентов в год.

Для различных отраслей промышленности наибольший интерес имеют именно технические пластики, которые, благодаря их свойствам, могут заменить в некоторых моментах конструкции из металла. Так как по сравнению с ними имеют меньший вес, большую стойкость к коррозии и другие полезные технические свойства [13].

В нефтяной, газовой и химической промышленности с недавних пор так же стали использоваться различные технические пластики.

В химической промышленности применяются, соответственно, химически стойкие пластики. Наиболее химически стойкими в отношении всех агрессивных сред являются фторсодержащие полимеры фторопласты. К числу кислотостойких пластмасс в отношении концентрированной соляной кислоты могут быть отнесены винипласт и фенопласты с асбестовым наполнителем. Стойкими к действию щелочей являются винипласт и хлорвиниловый пластики [14].

В газонефтяной промышленности пластики применяют для создания корпусов оборудования, уплотнений и опорных колец, втулок и т.д. Следовательно, пластики должны обладать высокой ударной прочностью, химической стойкостью, хорошими антифрикционными свойствами и иметь широкий температурный диапазон эксплуатации. К таким пластикам относятся: полипропилен, полиамид, поливинилиденфторид, полиэфирэфиркетон и др. [21].

Так же постоянно проводится разработка новых видов пластиков, которые бы не уступали по механическим и эксплуатационным свойствам металлам, а в некоторых моментах и превосходили их.

На сегодняшний день существует три основных метода сборки пластиковых изделий. А именно сборка при помощи различных крепежных элементов, склеивание и сварка.

Одним из инновационных и экономически эффективных способов получения надёжного неразъёмного соединения пластиков является технология ультразвуковой сварки, которая имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами неразъёмного получения соединения пластиковых изделий.

Но на сегодняшний день до конца остается не изучено влияние параметров режима ультразвуковой сварки на качество получаемых сварных соединений из относительно новых видов технических пластиков.

# **1 Технологические возможности применения ультразвуковой сварки в газонефтехимической отрасли**

## **1.1 Анализ и перспективы применения пластиков в газонефтехимии**

Нефтехимическая и газовая промышленность всего мира развивается прогрессивно и играет важнейшую роль в экономическом развитии любого современного государства. Они являются одними из основных и наиболее важных сфер промышленности, так как благодаря им развиваются другие отрасли промышленности, добываются необходимые ресурсы, для обеспечения других сфер. Так же попутно развиваются новые направления.

Предприятия нефтехимической промышленности играют немалую роль в обеспечении оборонной безопасности государства, выпуске инновационной электроники, лекарственных препаратов, косметических средств и т.д. Все предприятия нефтехимического комплекса поставляют остальным отраслям различные материалы: лаки, краски, пластмассу, удобрения и т.д.

Предприятия газовой промышленности занимаются добычей, переработкой и транспортировкой одного из самых важных энергетических ресурсов на планете – природного газа, который обеспечивает нас теплом, производственными ресурсами и промышленными мощностями. Без газа сейчас не обойтись в атомной и электроэнергетике, нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности, на химических производствах, в производстве оружия, в коммунально-бытовом хозяйстве и так далее [20].

В связи с этим предприятия нефтяной, газовой и химической промышленности являются одними из наиболее заинтересованных в разработке как новых технологий и оборудования, увеличивающих эффективность их работы, так и новых материалов, которые имели бы

наилучшие эксплуатационные и механические свойства по сравнению с имеющимися на данный момент.

Примером таких материалов являются новые полимеры, которые, благодаря своим свойствам вытесняют металлические изделия из данных сфер.

К основным преимуществам некоторых пластиков над металлами относят:

- снижение массы изделия;
- стойкость к коррозии;
- хорошая коррозионная стойкость к кислотам;
- не требует использование дополнительных покрытий;
- простота в изготовлении;
- возможность получения изделий различной формы [10].

Стоит отметить, что каждый пластик обладает своим набором уникальных свойств.

На сегодняшний день существует ряд фирм, которые занимаются производством изделий из различных пластиковых материалов именно для нефтяной, газовой и химической промышленности. Например, российская компания «Элмика» и немецкая компания «Ensinger».

Обе компании производят свою продукцию из одинаковых пластиков, которые приведены в таблице 1 [12].

Таблица 1 – Классификация пластиков применяемых в газонефтехимии

Группа	Обозначение пластиков	
	Аморфные	Полукристаллические
Высокотемпературные	PI, PAI, PES, PPSU, PEI, PSU	PEKEKK, PEK, PEEK, PPS, PTFE, PFA, ETFE, PVDF, PCTFE
Инженерные	PC, PA-6-3-T	PA46, PET, PBT, PA66, PA6, PA11, POM, PMP
Стандартные	PPE, PMMA, PS, ABS, SAN	PP, PE

Расшифровка обозначений пластиков, приведенных в таблице 1.1:

- PI – полиимид;
- PAI – полиамидимид;
- PES – полиэфирсульфон;
- PPSU – полифениленсульфон;
- PEI – полиэфиримид;
- PSU – полисульфон;
- PC – поликарбонат;
- PA-6-3-T – полиамид 6-3-T;
- PPE – полифениленэфир;
- PMMA – полиметилметакрилат;
- PS – полистирол;
- ABS – акрилонитрилбутадиенстирол;
- SAN – сополимер стирола и акрилонитрила;
- PEKEKK – полиэфиркетонэфиркетонкетон;
- PEK – полиэфиркетон;
- PEEK – полиэфирэфиркетон;
- PPS – полифениленсульфид;
- PTFE – политетрафторэтилен (тефлон или фторопласт-4);
- PFA – перфторалкоксидный полимер;
- ETFE – этилен-тетрафторэтилен;
- PVDF – поливинилденфторид;
- PCTFE – политрифторхлорэтилен;
- PA66, PA46, PA11, PA6 – полиамид с добавлением стекла (66...6%);
- PET – полиэтилентерефталат;
- PBT – полибутилентерефталат;
- POM – полиацеталь;
- PMP – полиметилпенте;
- PP – полипропилен;
- PE – полиэтилен [25].

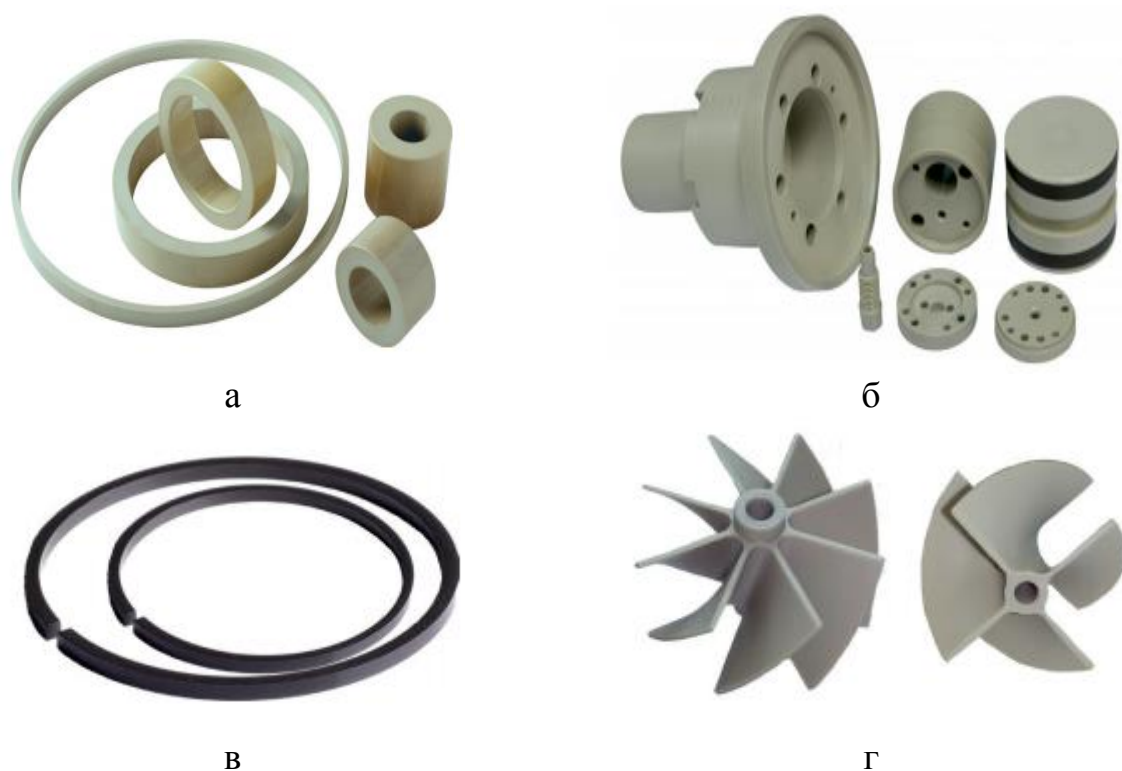


Как видно из таблицы 1 все пластики имеют либо аморфную, либо полукристаллическую молекулярную структуру. Данные виды материалов являются разновидностью, так называемых, термопластичных материалов.

Из данных пластиков, в зависимости от их свойств изготавливают различные изделия, применяемые в газонефтехимии.

Например, такие полимеры как РЕКЕКК, РЕК, и РЕЕК демонстрируют отличную надежность при одновременном воздействии агрессивных веществ, высоких температур (100 – 160 градусов Цельсия) и механических нагрузок. Данные материалы могут работать при давлении в 200 МПа. Из них изготавливают различные уплотнения, кольца, ведущие подшипники и шестерни, клапана, турбины, корпуса камер и датчиков, изоляторы, держатели, манжеты, седла и др.

Примеры деталей из данных пластиков приведены на рисунке 1.

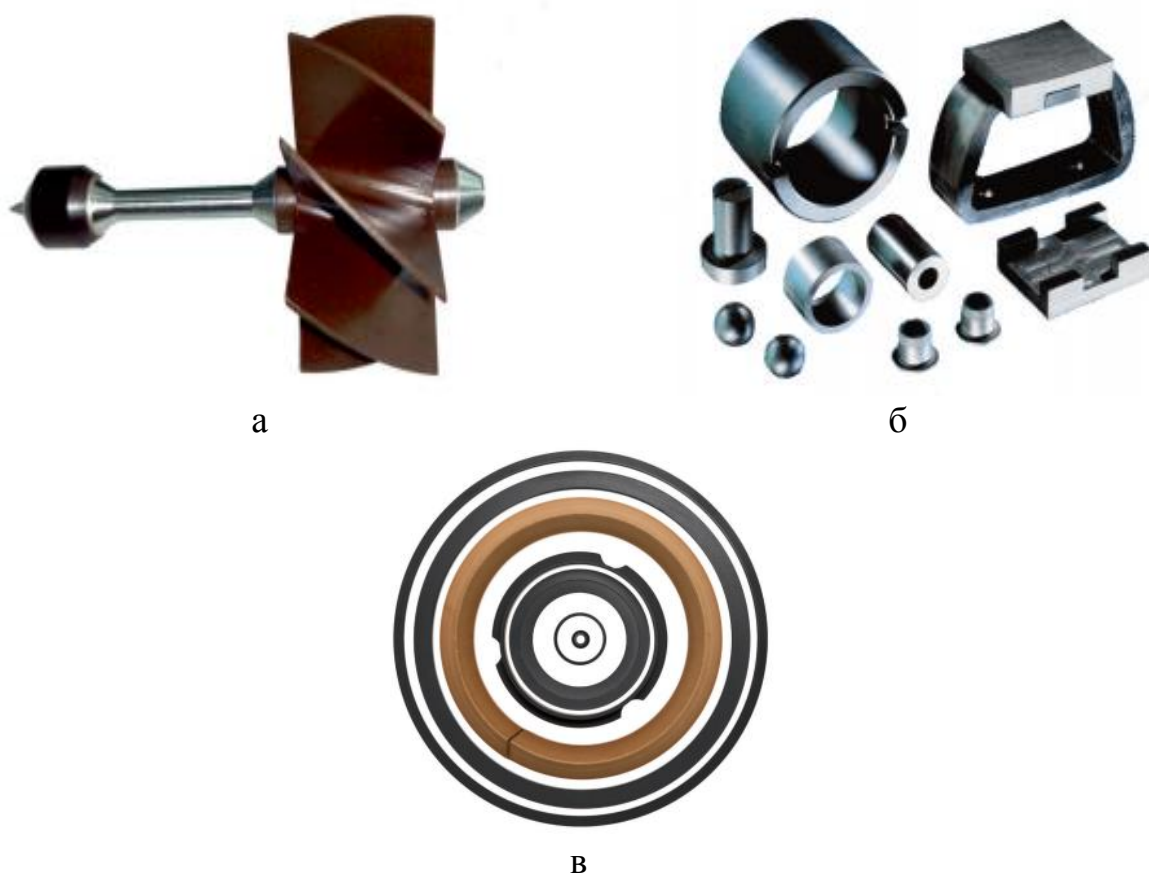


а – опорные кольца, б – корпус и вставка, в – уплотнительные кольца,  
г – турбины

Рисунок 1 – Детали из РЕКЕКК, РЕК, и РЕЕК пластиков

Полиимид (PI) и полиамидимид (PAI), модифицированные различными добавками, такими как стекловолокно, фторопласт, графит и другими, способны работать при высоких скоростях, при одновременном воздействии высокого давления и высоких температур. Например, PI 4021 способен работать при скоростях кручения до 300 000 об/мин. Данные материалы подходят для криогенных или вакуумных систем, не стойки к воздействию горячего пара и воды. Правда, имеют высокую стоимость, поэтому применяются только в тех узлах, где другие материалы не работают. Из них изготавливают различные кольца, уплотнения, клапаны, турбины, изоляторы, седла и так далее.

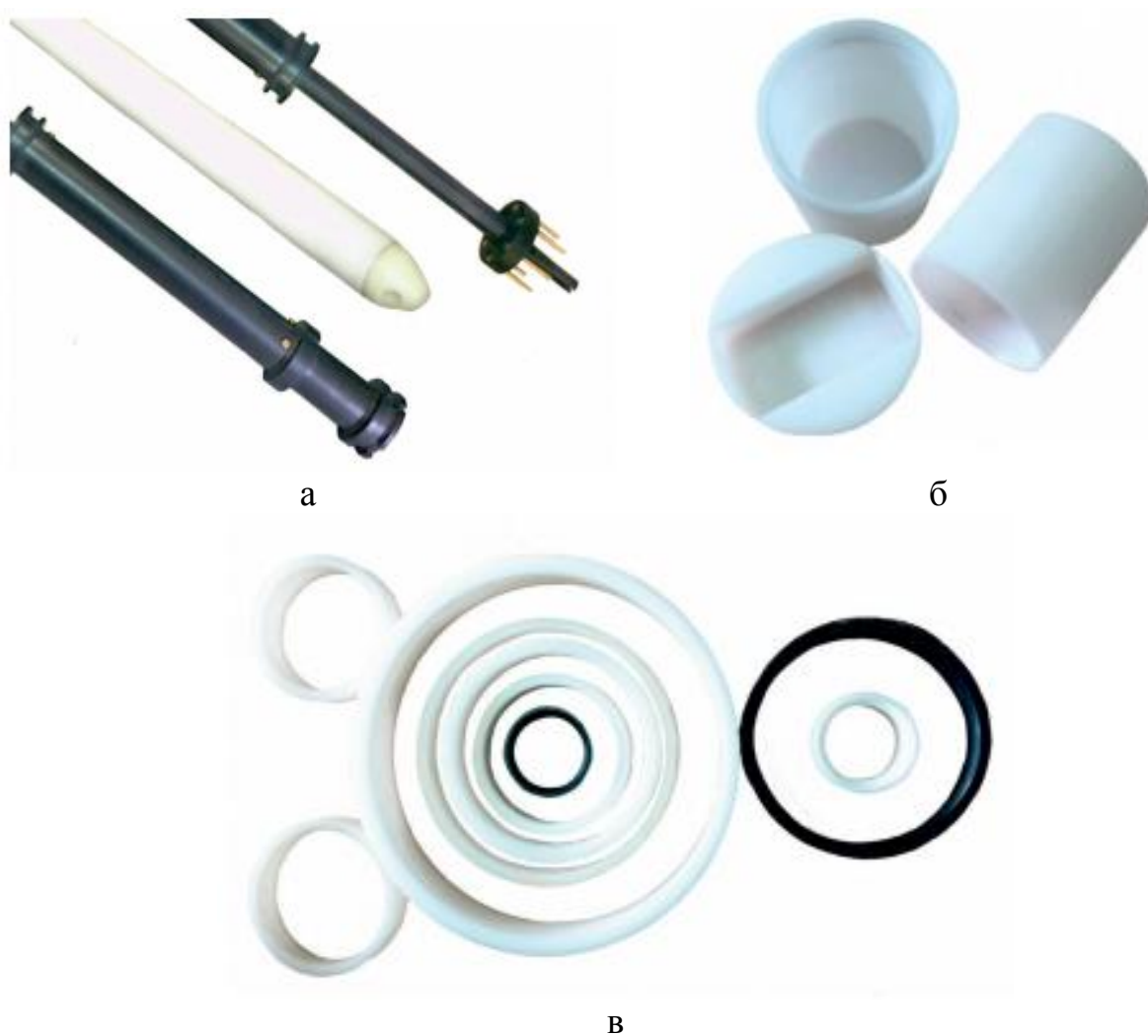
На рисунке 2 показаны детали, изготовленные из полиимида.



а – турбина, б – втулки скольжения и шарики подшипников,  
в – уплотнительные кольца

Рисунок 2 – Детали из PI пластика

Полиацеталь (POM) имеет минимальное поглощение жидкостей, способен работать при температурах от -30 до +100 градусов, при умеренных нагрузках. Хорошо обрабатывается механически. В основном его применяют для изготовления втулок, деталей вращения, уплотнителей, корпусов, колец и других изделий (рисунок 3).



а – зондовые части, б – защитные кожухи приборов,  
в – уплотнительные кольца

Рисунок 3 – Детали из POM пластика

Полиамид (РА) имеет отличные механические характеристики и хорошей стойкостью к износу. Материал предназначен для работы в умеренных нагрузках и температурах. В основном применяется не чистый

полиамид, а модифицированный различными добавками. Так, например, модификация полиамида 6 дисульфидом молибдена повышает его твердость и свойства скольжения, что делает его отличным аналогом изделий из бронзы. Добавление стекловолокна в полиамид повышает его жесткость, стабильность и термостойкость. Из данных типов пластика изготавливают различные уплотнения, лопасти, корпуса, кольца, седла и так далее (рисунок 4).



а – уплотнительные кольца, б – электроизоляционные детали,  
в – ходовые ролики и шестерни

Рисунок 4 – Детали из полиамида

Модифицированный полиэтилен (PE) обладает отличными свойствами скольжения и стойкости к абразивному износу, что делает его наиболее подходящим для изготовления уплотнений, которые работают в

отрицательном диапазоне температур и при абразивном износе. Так же из него изготавливают защитные покрытия от абразивного износа для различных элементов.

Полифениленсульфид (PPS) по сравнению с другими термопластами имеет высокую жесткость и твердость, имеет отличную химическую стойкость. В основном модифицируется фторопластом (50 – 70%), что повышает эластичность. Используется для изготовления различного рода уплотнений, работающих в нормальных условиях.

Фторопласты являются одними из самых химически стойких полимеров, они растворяются только в мезитилене и дихлорбензотрифториде. Им присущ низкий уровень газопроницаемости, а так же данные материалы стойки к криогенным воздействиям. Благодаря таким уникальным свойствам различные марки фторопластов применяются в технологиях переработки и транспортировке сжиженных газов [25].

## 1.2 Анализ существующих методов сборки пластиковых изделий

В настоящее время для соединения различных пластиковых изделий, в том числе изготовленных из термопластичных материалов, используют три основных способа сборки, которые представлены на схеме (рисунок 5).

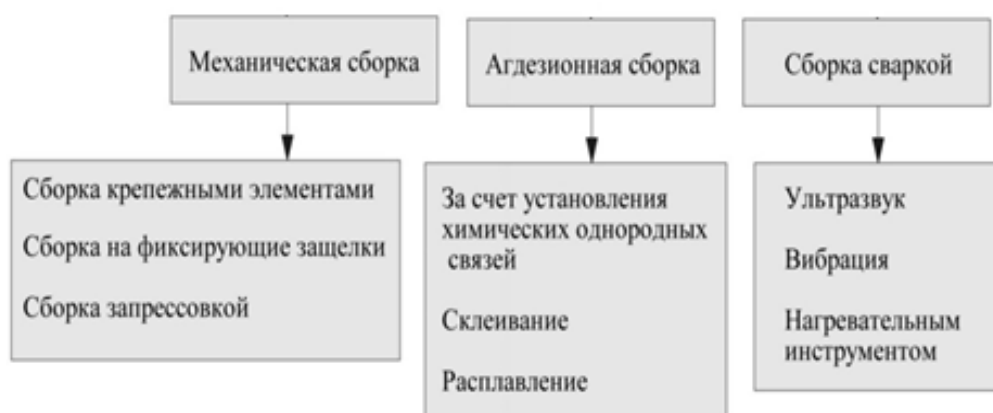


Рисунок 5 – методы сборки пластиковых изделий

Все представленные способы имеют ряд своих преимуществ и недостатков.

К примеру, механическая сборка по сравнению с другими способами является единственным методом получения разъемного соединения. Так же она является наиболее простым способом, так как соединение при механической сборке осуществляется за счет резьбы, различных метизов, защелок и так далее. Данный метод не требует подготовки поверхности соединяемых друг с другом деталей. Ему присуща низкая стоимость технологии сборки.

Но, у механической сборки есть один значимый недостаток, это потеря качества соединения со временем, особенно при динамических нагрузках или колебаниях. Так же для обеспечения герметичности подобного рода соединения требуется использовать дополнительные уплотнительные кольца и герметики, что со временем все равно может привести к потере качества соединения и образованию протечек.

Агдезионная сборка относится к способам получения неразъемного соединения, за счет применения различных химических растворов или клеев, благодаря которым между соединяемыми поверхностями устанавливаются молекулярные связи. С помощью данного способа, при правильном подборе связующего раствора, можно соединять изделия из разнородных материалов, а так же изделия сложной конфигурации.

Главным недостатком агдезионной сборки является то, что перед нанесением связующего раствора, кромки соединяемых деталей должны быть тщательно зачищены и обезжирены, что иногда может занять немало времени. Так же некоторые промышленные клеевые или эпоксидные растворы имеют высокую стоимость, а так же являются вредными для здоровья человека. Со временем некоторые клеевые соединения теряют свои прочностные свойства, что приводит к разрушению. Так же при воздействии на изделие различных нагрузок, клеевое соединение является опасным сечением, которое может их не выдержать [31].

Одним из инновационных и активно развивающихся способов сборки пластиковых изделий является сборка сваркой, которую по способам нагрева можно разделить на две группы, представленные на рисунке 6.



Рисунок 6 – Классификация способов сварки пластика

Различные способы сварки пластика нашли свое применение во многих отраслях промышленности. Например, сварка нагретым инструментом, активно применяется для соединения труб различных диаметров (рисунок 7).



Рисунок 7 – Установка для сварки нагретым инструментом труб

Соединение получается за счет того, что кромки свариваемых труб, закрепленных в оснастке, подводятся к нагретому диску и оплавляются. После чего диск убирают, а трубы сдавливают друг с другом. В процессе сварки образуется гладкое и монолитное неразъемное соединение.

На сегодняшний день, данный способ является одним из наиболее эффективных методов получения неразъемного соединения труб, изготовленных из термопластичных материалов [26].

Сварка горячим газом (рисунок 8) эффективно применяется для соединения тонколистовых конструкций или для нанесения пластиковых пленок.

При данном способе в зазор между свариваемыми деталями подают разогретый до определенной температуры газ или воздух, за счет чего происходит оплавление свариваемых кромок. После чего валиком или специальной оснасткой оказывают давление, тем самым формируют сварной шов [27].



Рисунок 8 – Сварка нагретым газом



Сварка экструзией (рисунок 9) эффективно применяется для соединения длинномерных пластиковых листов или балок при помощи стыковых или угловых швов.



Рисунок 9 – Экструзионная сварка

В данном случае между свариваемыми листами делается разделка кромок, чтобы осуществить проплавление на всю глубину. Сварка осуществляется при помощи специального прибора – экструдера, который своим жалом оплавляет свариваемые кромки и присадочную проволоку [16].

Все эти три способа сварки имеют общие недостатки, а именно:

- требуется качественная подготовка поверхностей перед сваркой (зачистка кромок, обезжиривание);
- требуется высокая квалификация сварщика.

Из всех способов сварки можно выделить ультразвуковую сварку, так как она имеет ряд существенных преимуществ по сравнению не только с

другими методами сварки, но и с другими способами получения неразъемного соединения пластиковых изделий.

Во – первых, перед ультразвуковой сварки не требуется зачистка или обезжиривание соединяемых поверхностей, так как высокочастотные колебания разрушают все масляные пленки и выводят загрязнения на поверхность сварочной ванны.

Во – вторых, она не требует использование различных дополнительных материалов, таких как клей или присадочная проволока. Потому что нагрев происходит, за счет активации внутренних источников энергии.

В – третьих, после ультразвуковой сварки получается неразъемное монолитное соединение, свойства которого ничем не отличаются от основного материала.

В – четвертых, при помощи ультразвуковой сварки можно соединять некоторые термопластичные материалы, неразъемная сборка которых другими методами затруднена или вовсе невозможна. Именно к таким пластикам относятся многие модифицированные инженерные полимеры, например, стеклонаполненный полиамид.

К недостаткам ультразвуковой сварки можно отнести:

- сложность оборудования, что в современном мире активно пытаются исправить разработчики ультразвукового оборудования, делая комплексы все более понятными и простыми для понимания;
- не эффективность при сварке длинномерных конструкций, так как данный процесс занимает больше времени по сравнению с аналогами [11].

Исходя из выше сказанного, можно сделать вывод, что пластиковые изделия, применяемые в нефтяной, газовой и химической промышленности, не требующие получения неразъемного герметичного соединения эффективнее всего соединять при помощи механической сборки. Трубы, изготовленные из термопластичных материалов различного диаметра, –

соединять при помощи сварки нагретым инструментом. А различные корпуса датчиков эффективнее всего сваривать при помощи ультразвуковой сварки.

### 1.3 Физические основы ультразвуковой сварки

Принцип технологии ультразвуковой сварки основан на вводе в свариваемые детали колебаний высокой частоты, которые в свою очередь активизируют внутренние источники энергии материала, а именно молекулярное трение, которое и приводит к локальному разогреву.

Колебания, которые возникают в различных средах и характеризуются их упругими деформациями принято называть упругими колебаниями, которые в зависимости от частоты колебаний могут иметь различные формы колебаний, так называемые гармоники.

Самой распространенной формой упругих колебаний являются гармонические колебания, которые можно описать формулой:

$$A = A_M \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где  $A$  – деформация в средт в момент времени  $t$ ;

$A_M$  – максимальное значение деформации;

$\omega$  – круговая частота колебаний;

$\varphi$  – начальный угол сдвига.

Гармонические упругие колебания, частота которых превышает слышимый человеком диапазон, свыше 17 – 20 кГц, называют ультразвуковыми колебаниями. На производстве используют колебания в диапазоне от 8 кГц до 1 МГц. Для ультразвуковой сварки используют частоты от 18 кГц до 80 кГц.

Немало важным параметров является скорость распространения ультразвуковой волны в среде, которая зависит от модуля упругости и плотности материала. В большинстве твердых тел данный показатель лежит

в диапазоне от 2000 до 6000 метров в секунду. Скорость ультразвуковой волны так же может меняться в зависимости от температуры среды.

Мощность переносимая ультразвуковой волной зависит от свойств материала и характеризуется потоком акустической энергией, формула:

$$\Phi = \int_S J dS \cos \beta, \quad (2)$$

где  $\beta$  – угол между нормалью к площади  $dS$  и направлением распространения волны;

$J$  – интенсивность плоской продольной звуковой волны.

Интенсивность звуковой волны определяется из уравнения:

$$J = k(Af)^2 \rho c, \quad (3)$$

где  $A$  – амплитуда колебаний;

$f$  – частота колебаний;

$\rho$  – плотность среды;

$k$  – коэффициент пропорциональности;

$c$  – скорость звука в среде [15].

Процесс генерации упругих гармонических колебаний и их передачи осуществляется за счет комплексов для ультразвуковой сварки (рисунок 10).

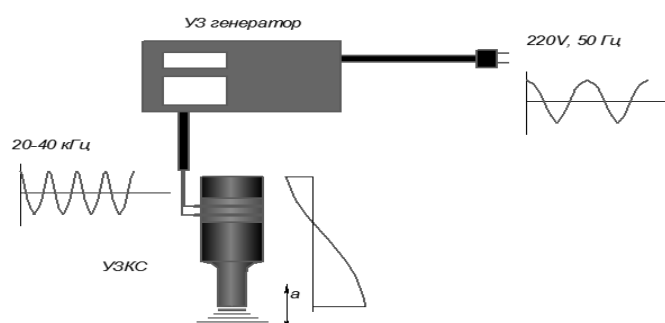


Рисунок 10 - Структурная схема комплексов для ультразвуковой сварки

Оборудование для ультразвуковой сварки в основном состоит из двух основных частей: ультразвуковой генератор и ультразвуковая колебательная система.

Ультразвуковой генератор повышает ток питающей сети, который имеет частоту 50 Гц, до ультразвукового диапазона. Затем получившийся высокочастотный ток передает к колебательной системе. Немало важной задачей генератора является осуществлять постоянный контроль выходной частоты, чтобы поддерживать ультразвуковую колебательную систему в резонансе. Так же генератор отвечает за настройку мощность и времени ультразвуковой сварки.

Ультразвуковая колебательная система в свою очередь состоит из двух или трех частей, в зависимости от ее типа: преобразователь, усилитель, волновод.

Высокочастотный ток из генератора поступает на преобразователь в колебательной системе, который превращает электрические колебания высокой частоты в собственные механические колебания, за счет эффекта магнитострикции.

Амплитуда собственных колебаний преобразователя незначительна, и ее недостаточно для осуществления процесса ультразвуковой сварки. Поэтому механические колебания передаются на усилитель, который жестко присоединен к преобразователю.

Усилитель, за счет разницы площадей сечений на его торцах, увеличивает амплитуду колебаний в несколько раз. Каждый усилитель имеет свой коэффициент усиления амплитуды.

После чего колебания передаются на волновод, который так же жестко связан с усилителем.

Задача волновода передать ультразвуковые колебания к свариваемым деталям и сформировать шов в процессе расплавления пластика.

На данный момент существуют два типа ультразвуковых колебательных систем, которые отличаются видом преобразователей: пьезокерамические и магнитоотриксционные.

На рисунке 11 показана схема магнитоотриксционной колебательной системы:

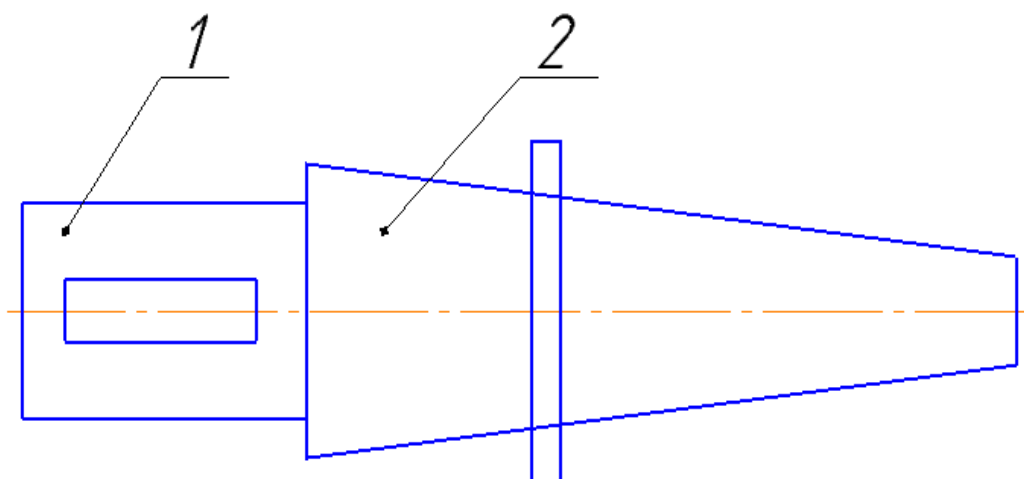


Рисунок 11 – Магнитоотриксционная колебательная система

Данная система состоит из магнитоотрикстора 1, который является преобразователем ультразвука, и волновода 2, который одновременно служит и для усиления амплитуды колебаний, и для их передачи к свариваемым деталям.

Магнитоотрикстор представляет собой пакет пластин из сплава на основе железа и кобальта – К49Ф2. Данный сплав обладает магнитоотриксционными свойствами, то есть при попадании в переменное магнитное поле, его размеры начинают изменяться, другими словами он начинает колебаться с определенной частотой. Собственная частота колебаний магнитоотриксционного преобразователя напрямую зависит от его геометрических размеров.

Пластины, в свою очередь, припаяны к переходнику из стали при помощи серебряного припоя и скреплены друг с другом эмалью. На

стержнях магнитостриктора нанесена обмотка, на которую и подается высокочастотный ток с генератора.

На рисунке 12 представлено фото ультразвуковой магнитострикционной колебательной системы.

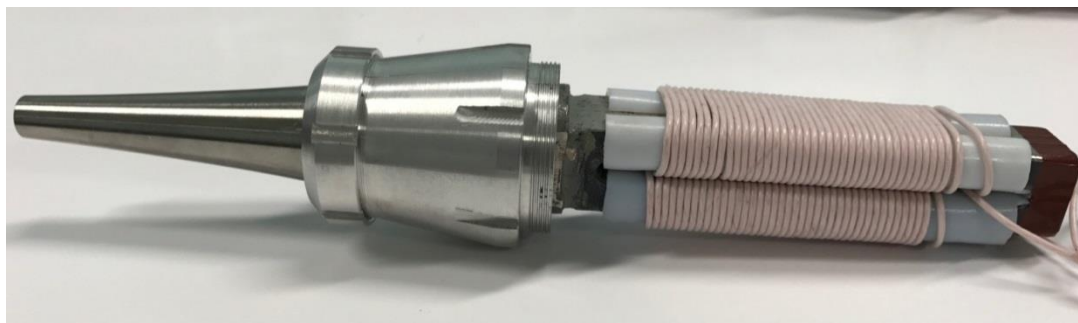


Рисунок 12 – Ультразвуковая колебательная система в сборе

Данные колебательные системы применяют при мощности сварки до 1 кВт, при более высоких показателях мощности проявляется нестабильность работы и захвата резонансной частоты. Так же они способны долгое время работать в непрерывном режиме.

На рисунке 13 приведена схема пьезокерамической колебательной системы:

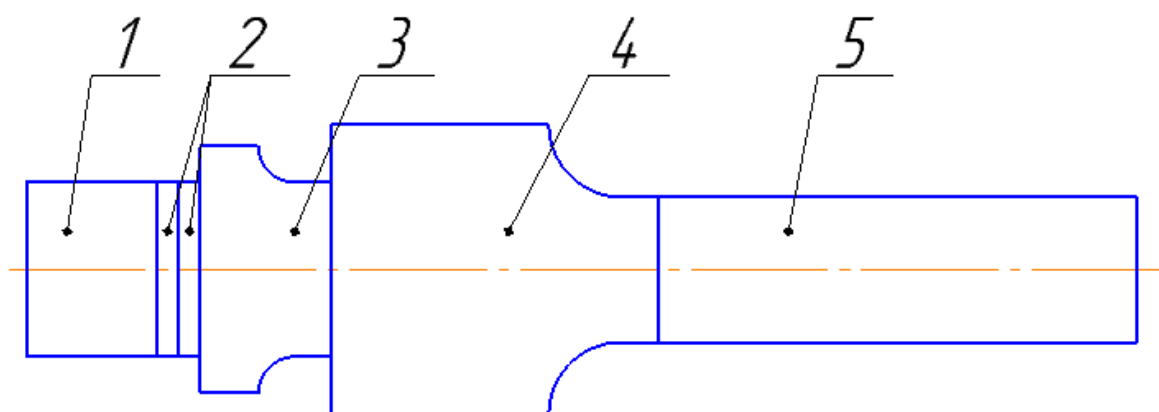


Рисунок 13 – Пьезокерамическая колебательная система

Данная система состоит из отражательной накладки 1, которая гасит часть колебаний и направляет их в сторону волновода. Пьезокерамических шайб 2, которые и являются преобразователем ультразвука. Они состоят из спрессованной смеси различных порошков, обладающих магнитострикционными свойствами. На сегодняшний день существует более 50 видов пьезокерамики. Пьезокерамические шайбы жестко притянуты к переходнику 3, который соединен с усилителем 4 и волноводом 5.

Пьезокерамические ультразвуковые колебательные системы способны стабильно работать на высоких мощностях, от 1 кВт. Но они имеют меньший ресурс работоспособности, чем магнитострикционные.

В зависимости от вида термопластичных пластиков различают два способа ультразвуковой сварки: прямой и дистанционный.

Как уже было сказано все термопластичные материалы в зависимости от их молекулярного строения делят на аморфные и полукристаллические.

Структура аморфных термопластов хаотична и беспорядочна. У полупрозрачных, напротив, организована и повторяется. Она напоминает кристаллическую решетку металлов.

Разность в молекулярной структуре термопластичных материалов влияет на их поведение при нагреве.

Аморфные пластики не имеют строгой температуры плавления. В процессе нагрева они постепенно переходят в пластичное состояние. А при охлаждении так же плавно начинают затвердевать.

У полупрозрачных материалов есть ярко выраженная температура плавления. Для перехода в пластичное состояние и осуществления плавления полупрозрачным пластикам требуется больше вложение тепловой энергии, чем аморфным пластикам. Полупрозрачные пластики остаются в твердом состоянии до тех пор, пока температура нагрева не достигнет температуры плавления, после чего они моментально переходят в пластичное состояние. При охлаждении происходит так же быстрое затвердевание из-за быстрой рекристаллизации молекул пластика.



График на рисунке 14 показывает различия в поведении при нагреве данных пластиков.

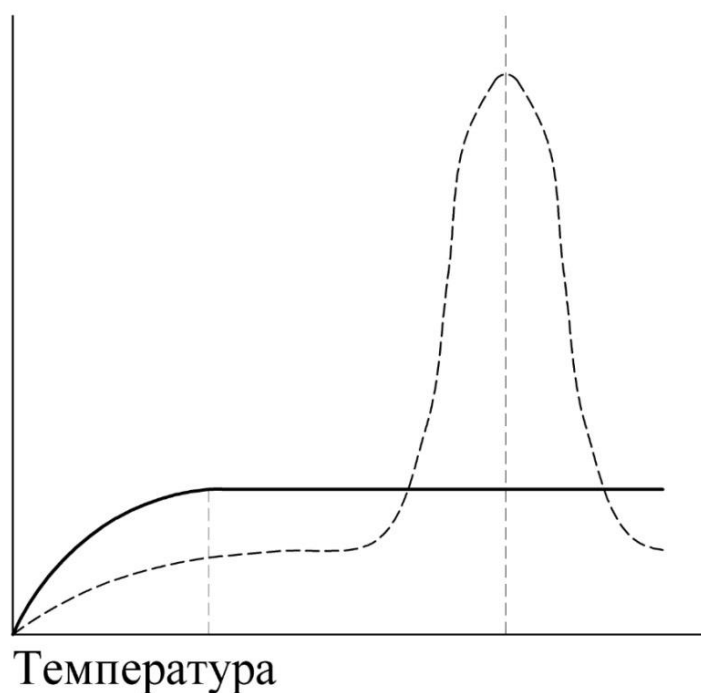


Рисунок 14 – Расплавленные состояния для аморфных (сплошная линия) и полупрозрачных (штриховая линия) материалов

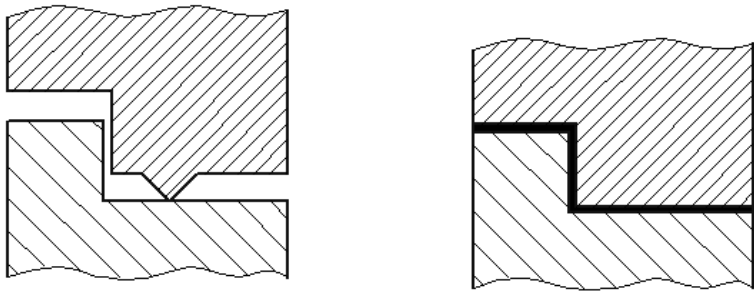
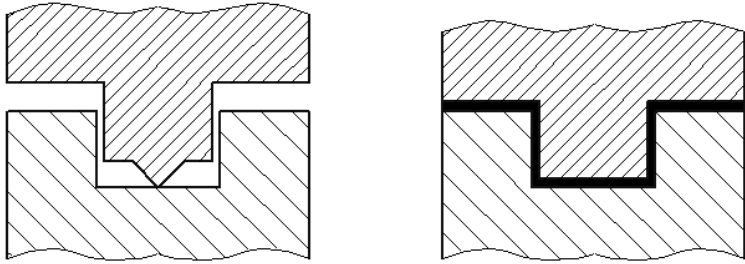
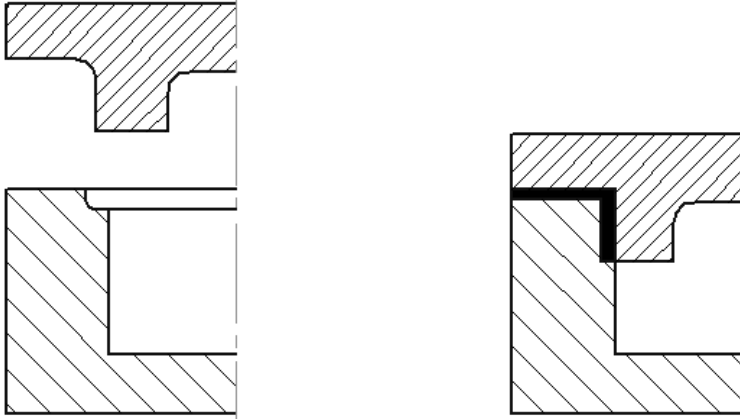
Так как полупрозрачные пластики имеют организованную структуру молекул, они способны поглощать акустическую энергию, что позволяет ей пройти сквозь объем данных пластиков с небольшим рассеиванием. Именно благодаря этой особенности полупрозрачные пластики можно сваривать дистанционной ультразвуковой сваркой, когда колебания прикладываются к поверхности одной из свариваемых деталей, а расплавление происходит в стыке между деталями.

Аморфные пластики можно сваривать только прямой ультразвуковой сваркой, когда расплавление материала происходит непосредственно под торцом волновода.

Данные различия обусловили технологические схемы для получения неразъемных соединений при помощи ультразвуковой сварки аморфных или полукристаллических видов термопластичных пластиков.

Технологические схемы ультразвуковой сварки аморфных пластиков приведены в таблице 2:

Таблица 2 – Технологические схемы дистанционной ультразвуковой сварки

Наименование	Схема сварки	
Шаговое ступенчатое		
Пазовое		
Внутреннее угловое		

Аморфные пластики в основном сваривают точечной или шовной ультразвуковой сваркой, при которой форма сварочного шва и глубина проплавления зависит от формы волновода [2].

#### **1.4 Обзор технических решений в области ультразвуковой сварки**

На данный момент во всем мире существует ряд компаний, которые занимаются разработкой и созданием различного рода оборудования для ультразвуковой сварки термопластичных материалов. И с каждым годом их число лишь растет.

Флагманами в разработке нового оборудования для ультразвуковой сварки являются европейские компании «Herrmann Ultrasonic», «Dukane», «Branson» и «Rinco Ultrasonic». В России наиболее известны «Ультрарезонанс» и «U-Sonic». Данные компании так же занимаются не только производством стандартного оборудования, но и разработкой принципиально новых моделей комплексов для ультразвуковой сварки.

Например, компания «Herrmann Ultrasonic» в 2017 году разработала полностью автоматический станок для многоточечной ультразвуковой сварки пластиковых деталей для автопрома (рисунок 15).

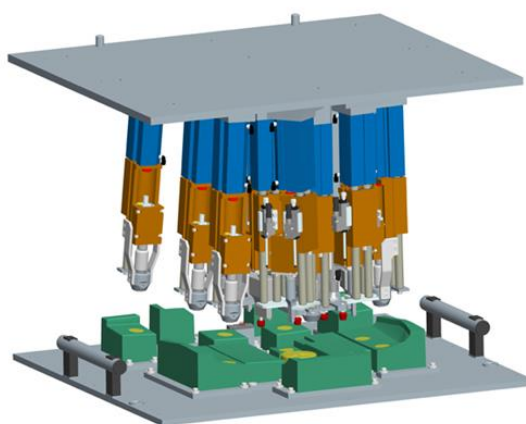


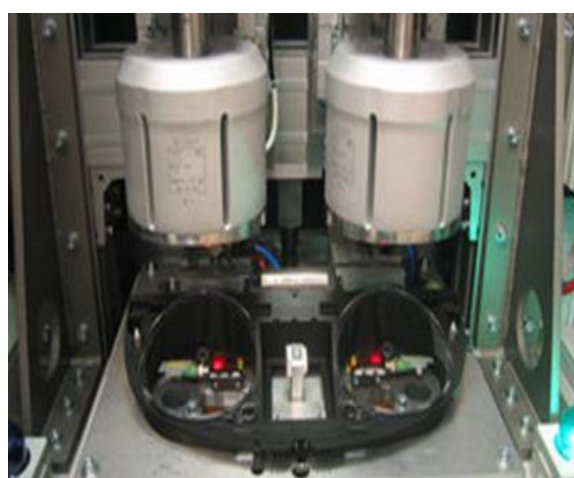
Рисунок 15 – Многоточечный автоматизированный комплекс фирмы «Herrmann Ultrasonic»

На модели изображено несколько ультразвуковых волноводов, которые крепятся на верхней подвижной платформе. Внизу, на ложемент, который повторяет форму детали, укладывается пластиковая панель и элементы, которые необходимо к ней приварить. Ультразвуковая сварка осуществляется по группам точек, что позволяет существенно сократить время производства детали.

На рисунке 16. показаны другие варианты многоточечных машин, разработанных «Herrmann Ultrasonic» [28].



а



б



в

а – сварка чехла КПП, б – сварка панели приборов, в – сварка бампера

Рисунок 16 – Рабочие зоны многоточечных машин, разработанных «Herrmann Ultrasonic»

Компания Dukane (Германия) так же имеет собственную линейку ультразвукового оборудования для сварки полимерных материалов. На рисунке 17 показан ручной комплекс для ультразвуковой сварки. Он состоит из ультразвукового генератора и ультразвукового пистолета, соединённого кабелем.



Рисунок 17 – Ручной комплекс для ультразвуковой сварки фирмы «Dukane»

Данный комплекс предназначен для мелкосерийного производства. В крупносерийном и массовом производстве эффективнее всего применять, разработанную данной компанией установку прессового типа (рисунок 18) [4].



Рисунок 18 - Ультразвуковая установка прессового типа фирмы «Dukane»

Данная установка прессового типа состоит из ультразвуковой колебательной системы на основе пьезокерамических преобразователей. Вертикальное перемещение колебательной системы осуществляется с помощью пневматического цилиндра, который закреплен на вертикальной направляющей, которая, в свою очередь, закреплена на опорной колонне, установленной на нижней платформе установки. К колонне прикреплен монитор, для отслеживания показателей во время сварки и ввода необходимых значений параметров режима ультразвуковой сварки.

На рисунке 19 представлены более производительные полуавтоматические линии карусельного (а) и последовательного типов (б) для непрерывной ультразвуковой сварки пластиковых изделий [29].



Рисунок 19 – Ультразвуковые полуавтоматические линии фирмы «Dukane»

Компания U-Sonic в 2018 году разработала собственную конструкцию многоточечной машины для ультразвуковой сварки полимерных материалов, которая представлена на рисунке 20. Особенностью данного комплекса

является, возможность выполнения одновременно не только операции сварки, но и пробития отверстий и нанесение клейма при помощи ультразвуковых колебаний.

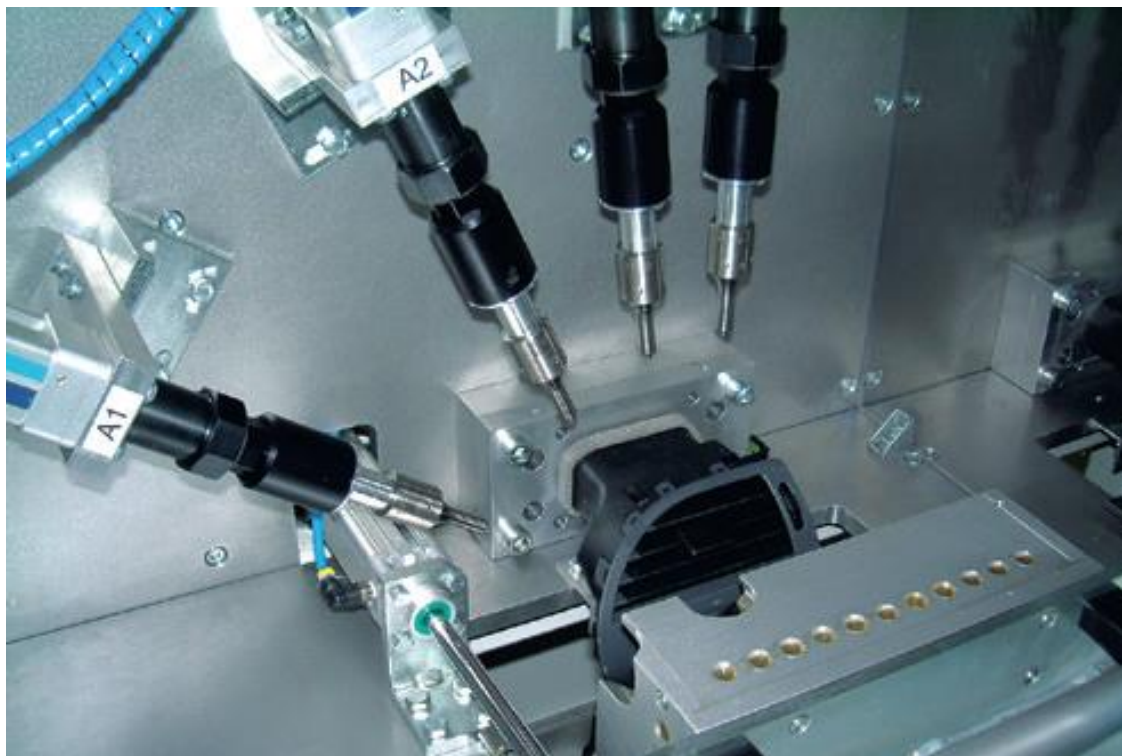


Рисунок 20 – Многоточечная машина для ультразвуковой сварки компании «U-Sonic»

Заготовка детали устанавливается на ложемент. В ультразвуковые волноводы, расположенные в верхней части станка, закладываются элементы, которые требуется приварить к основной детали. Передвижение колебательных систем осуществляется за счет пневматических цилиндров поочередно. Из-за того, что каждая колебательная система подключена к своему генератору и имеет разные волноводы под разные задачи, на данной установке можно осуществлять одновременно и сварку, и пробитие отверстий, и нанесение клейма [30].

В эпоху пандемии коронавирусной инфекции спрос на одноразовые медицинские маски резко вырос. Для более быстрого и эффективного

производства данного продукта многие компании по продаже ультразвукового оборудования, как в России, так и за рубежом, разработали швейные машинки (рисунок 21), которые при помощи высокочастотных колебаний осуществляют сварку нетканых материалов.



Рисунок 21 – Ультразвуковая швейная машинка

Данный комплекс состоит из вращающегося валика, который прижимает свариваемые материалы к плоскому волноводу типа нож. Так же данный валик обеспечивает передвижение материалов.

### **1.5 Анализ исследований, проведенных в области ультразвуковой сварки полимеров**

Открытие ультразвуковой сварки, как процесса получения неразъемных соединений, связано с исследованием использования колебаний высокой частоты для очистки поверхностей, соединяемых с помощью контактной сварки. В ходе экспериментов было обнаружено, что при одновременном воздействии на зону сварки усилия сжатия и ультразвуковых колебаний соединение образцов из мягких алюминиевых сплавов осуществляется без пропуска через них сварочного тока.



Но дальнейшему развитию ультразвуковой сварки препятствовало отсутствие сведений о процессах образования соединений и специализированного оборудования.

С появлением пластиков, ультразвуковая сварка нашла новое применение в индустрии. На сегодняшний момент существует ряд исследований в области ультразвуковой сварки пластиков, которые направлены на изучение не только влияния параметров режима сварки на качество соединения, но так же и на изучение фундаментальных основ ультразвуковых колебаний в различных твердых средах.

В 2018 году компания «Dukane» опубликовала данные, представленные в таблице 3, в которой отражены результаты исследования совместимости различных термопластичных материалов друг с другом при ультразвуковой сварке:

Таблица 3 – Совместимость термопластичных материалов

	ABS	ACETAL	ACRYLICS	CELLULOSICS	XYCOLOY-800	CYCOVIN	KYDEX	NORYL	NYLON	PC	PE	PP	PS	POLYSULFONE	PVC	SAN	POLYSTER	XT-POLYMER
ABS	☆		☆		☆					△						△		△
ACETAL		☆																
ACRYLICS	☆		☆		△	△	△			△						△		△
CELLULOSICS				☆														
XYCOLOY-800	△		△		☆	△	△									△		△
CYCOVIN	△		△		△	☆	△								△			△
KYDEX	△		△		△	△	☆								△			△
NORYL								☆					☆			△		
NYLON									☆									
PC	△				☆					☆				△				
PE											☆							
PP												☆						
PS								☆					☆			△		△
POLYSULFONE										△				☆				
PVC						△	△								☆			
SAN	△		△		△			△					△			☆		
POLYSTER																	☆	
XT-POLYMER	△		△		△	△	△						△			△		☆

☆ качество сварки очень хорошее    △ качество сварки хорошее

Судя по пустым клеточкам в данной таблице, можно сделать вывод, что исследования качества сварки этих термопластичных материалов не проводились. Так же в таблице представлены наиболее популярные виды пластика. Отсутствуют различные инженерные термопласты, такие как модифицированный стекловолокном полиамид или фторопласт, которые на сегодняшний день начинают применяться все активнее в промышленности [29].

Исследования по влиянию различных параметров ультразвуковой сварки полимерных и нетканых материалов на качество получаемых соединений активно проводятся в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана под руководством С.С. Волкова.

Например, в статье «Особенности теплообразования при ультразвуковой сварке жестких пластмасс» авторы ставят цель – выявить причины снижения прочности стыковых соединений жестких пластмасс, к которым относят большинство современных технических полимеров.

В ходе проведения исследований был получен кинетический механизм образования соединения по схеме «с преимущественным внедрением», который представлен на рисунке 22.

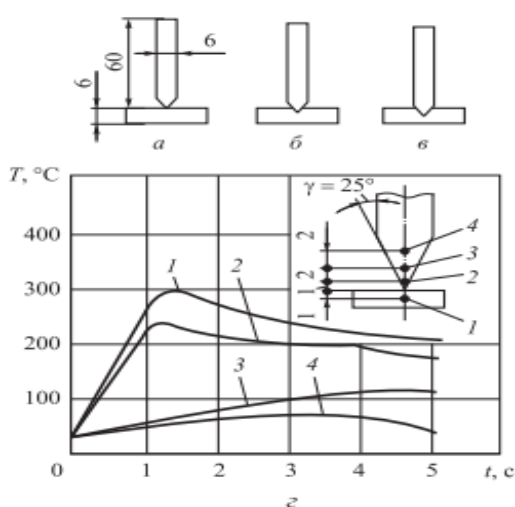


Рисунок 22 – Кинетический механизм образования соединения по схеме «с преимущественным внедрением»

При данном механизме на одном из образцов осуществляют разделку кромок в виде клина, который в процессе ультразвуковой дистанционной сварки внедряется в другой образец на 2 – 4 мм.

Так же был получен кинетический механизм, используя схему «с преимущественным оплавлением», который показан на рисунке 23.

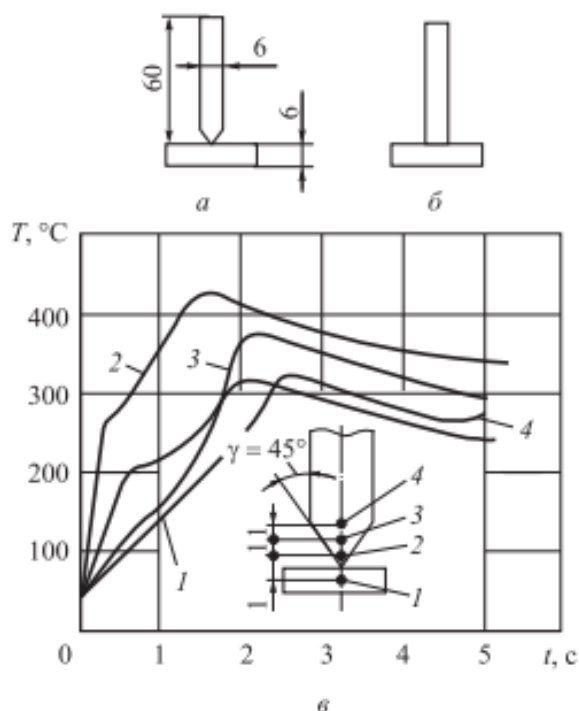


Рисунок 23 – Кинетический механизм образования соединения по схеме «с преимущественным оплавлением»

При данном механизме клин в процессе ультразвуковой дистанционной сварки внедряется в другой образец примерно лишь на 1 миллиметр. Так как акустическая энергия ультразвуковых волн концентрируется на кончике клина, то при данном механизме температура нагрева в зоне сварки будет максимальной.

В данной статье авторами были сделаны следующие выводы:

- удельная мощность, выделяемая в единице объема деталей при УЗС, существенно зависит от площади контакта между ними;

- при конструировании стыков соединяемых деталей необходимо предусмотреть разделку кромок для уменьшения площади контакта между ними, что способствует равномерному распределению температур по всему сварному шву;
- разделка кромок при УЗС жестких пластмасс повышает прочность создаваемого соединения, улучшает его внешний вид и сокращает время УЗС [9].

Немало важным фактором, влияющим на качество получаемого соединения при ультразвуковой сварке, является форма разделки кромки.

В своей статье «Влияние разделки кромок на свариваемость пластмасс при ультразвуковой сварке» Волков С.С. дает рекомендации по выбору разделки кромок при ультразвуковой сварке жестких пластиков (рисунок 24).

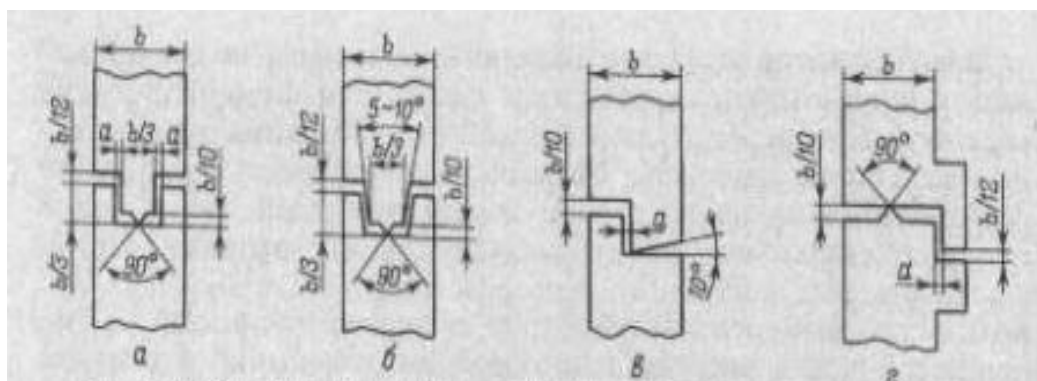


Рисунок 24 – Варианты разделок кромок жестких пластиков

Разделка кромок, показанная на рисунке 24 а, обеспечивает значительное повышение прочности и герметичности сварного шва. Такая разделка требует точной подгонки углубления в одной из стыкуемых деталей к выступу на другой, что вызывает производственные трудности.

Конструкция разделки сварного шва, изображенная на рисунке 24 б, не требует такой тщательной подгонки.

При сварке изделий, к которым предъявляются повышенные эстетические требования, можно использовать разделку стыков, приведенную на рисунке 24 в.

Разделки стыкуемых кромок, применяемые при сварке емкостей или контейнеров, изображены на рисунке 24 г.

Применение разделок, приведенных на рисунке 24 в и г, исключает видимый валик или делает его малозаметным. При изготовлении газо- и водонепроницаемых баллонов предпочтение следует отдать разделкам, показанным на рисунке 24 г, которые обеспечивают достаточно высокую прочность и отвечают эстетическим требованиям.

В некоторых случаях конструкция разделки проектируется с углами, отличными от  $90^\circ$ : может быть разделка кромок с углом при вершине V-образного выступа в  $60^\circ$  и в  $45^\circ$ . Между сопрягаемыми по вертикали деталями необходимо предусматривать зазор, примерно равный  $0,1$  мм. [8].

Авторы: Л.А Шестель, Ю.А. Саяпин, В.А. Соколов, в своей статье «Многоточечная ультразвуковая сварка конструкций из жестких пластмасс» приводят различные зависимости прочности сварных соединений из жестких пластиков от различных факторов (рисунок 25).

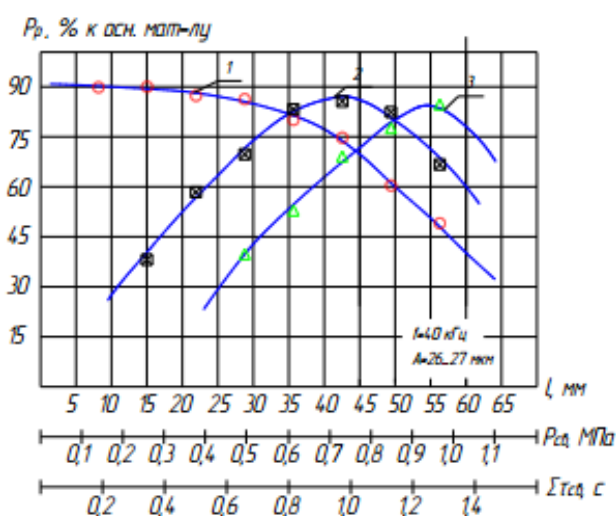


Рисунок 25 – Зависимость прочности сварных соединений от: 1-расстояния места ввода колебаний, 2-сварочного давления, 3-времени

В ходе экспериментов было установлено, что максимальная прочность сварного соединения наблюдается под инструментом и на расстоянии от него по длине шва в пределах 30 – 45 мм. При дальнейшем удалении от места ввода колебаний прочность соединения существенно падает. Так, на расстоянии 50 – 65 мм от ввода колебаний ее значение снижается до 50 %, и менее от прочности основного материала. При этом интенсивность снижения прочности соединения зависит от давления в зоне сварки, определяемого как величина прилагаемого к инструменту [32].

Проанализировав научные публикации в области ультразвуковой сварки можно сделать вывод, что на данный момент существует не так много данных о влиянии параметров режима сварки на качество получаемого соединения из конкретных видов технических пластиков. В основном описываются лишь общие рекомендации. Так же крайне мало исследований, проводимых не на образцах, а на определенных деталях.

В связи с вышесказанным, целью работы является – исследование влияния параметров режима ультразвуковой сварки на формирование качественного сварного соединения корпуса клапана адсорбера.

### **Выводы по главе**

Был проведен анализ перспективы применения пластиков, применяемых в газонефтехимии, и методов их сборки. В ходе анализа, наилучшим методом для получения герметичных соединений корпусных небольших деталей была выбрана ультразвуковая сварка.

Были рассмотрены физические основы ультразвуковой сварки. И проведен анализ технических решений в области ультразвука.

Был проведен теоретический анализ научных публикаций по ультразвуковой тематике.

## **2 Разработка методики и оборудования для проведения исследований**

### **2.1 Описание объекта исследований**

В качестве объекта исследований был выбран корпус клапана адсорбера (рисунок 26), изготовленный из Технамида марки А-СВ-30-ТАФ.



Рисунок 26 – Корпус клапан адсорбера

Технамид марки А-СВ-30-ТАФ, представляет собой композиционный материал на основе полиамидных смол, а так же с содержанием 30%

структурированных стеклянных нитей. Для термостабилизации и придания антифрикционных свойств, дополнительно модифицирован графитом.

Данный вид пластика имеет следующие особенности:

- обладает стойкостью к термокороблению;
- способен работать в диапазоне температур от -60 до +150 °С;
- имеет сниженный коэффициент трения и стойкость к износу;
- имеет возможность длительной эксплуатации при одновременном воздействии механических напряжений, повышенных температур, химических сред и водяных паров, а также масел;
- обладает стойкостью к воздействию щелочей, электролита, слабых кислот, растворов солей и неполярных растворителей.

Физические и механические свойства Технамида представлены в таблице 4 [17].

Таблица 4 – Физикомеханические свойства Технамид А-СВ-30-ТАФ

Модуль упругости при растяжении, ГПа	9.5
Удлинение при разрыве, %	3
Прочность при растяжении, МПа	170
Модуль упругости при изгибе, ГПа	8.5
Ударная вязкость по Шарпи на образцах с надрезом при 20 <sup>0</sup> С, кДж/м <sup>2</sup>	6
Температура изгиба под нагрузкой (1.81 МПа), °С	240
Средний коэффициент линейного термического расширения, 1/К	3
Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом	
-сухие образцы	10 <sup>15</sup>
-влажные образцы	10 <sup>13</sup>
Удельное объемное электрическое сопротивление, Омсм	
-сухие образцы	10 <sup>15</sup>
-влажные образцы	10 <sup>13</sup>
Электрическая прочность, кВ/мм	
-сухие образцы	28
-влажные образцы	24
Коэффициент трения	0.25

Данный вид пластики может применяться в нефтяной, газовой и химической промышленности для изготовления корпусов различных датчиков, так как имеет стойкость к химическим веществам и маслам.



В основном все датчики состоят из трех основных частей: крышка, корпус и механизм датчика.

Клапан адсорбера не исключение, он состоит из верхней крышки, изображенной на рисунке 27:



Рисунок 27 – Крышка клапана

Корпуса, представленного на рисунке 28:



Рисунок 28 – Корпус клапана

В качестве датчика в нем установлена электромагнитная катушка-клапан (рисунок 29):



Рисунок 29 – Электромагнитный клапан

Одним из основных требований, предъявляемых к корпусу клапана адсорбера, является – обеспечение надежного неразъемного и герметичного соединения крышки клапана с его корпусом [6].

## **2.2 Проектирование установки для экспериментальных исследований**

### **2.2.1 Проектирование и изготовление ультразвуковой колебательной системы**

Проектирование ультразвуковой колебательной системы начинается с определение необходимой удельной энергии для сварки однородных материалов и требуемой акустической мощности, передаваемой ультразвуковыми волнами.

Чтобы найти удельную энергию, воспользуемся формулой:

$$Q = (0.8 - 1.0)c\rho T_{\text{пл}}, \quad (4)$$

где  $c$  - удельная теплоемкость материала,

$\rho$  – плотность;

$T_{\text{пл}}$  - температура плавления.

Согласно международному стандарту ISO 527-2, Технамид А-СВ-30-ТАФ имеет плотность  $\rho=1.34$  г/см<sup>3</sup>. По данным стандарта ISO 22007-4: 2008 обладает удельной теплоемкостью  $c=1.2$  Дж/г·К и согласно стандарту DIN 53765 его температура плавления составляет 254 °С, что равно 527К.

Используя формулу (4) рассчитаем удельную энергию:

$$Q = 0.9 \cdot 1.2 \cdot 1.34 \cdot 527 = 762 \text{ Дж/см}^3$$

Необходимую акустическую мощность ультразвуковой энергии, которая требуется для сварки, найдем по формуле [1]:

$$Q_{\text{ак}} = f\pi E \varepsilon^2 \quad (5)$$

где  $E$  - модуль упругости материала,

$\varepsilon$  - амплитуда деформации;

$f$  – частота колебаний.

При ультразвуковой сварки амплитуду деформации  $\varepsilon$  обычно принято считать равной примерно 10 мкм. [7]. Модуль упругости  $E$  Технамида А-СВ-30-ТАФ, согласно международному стандарту ISO 527-2, равен 5.5 МПа. Частота колебаний у обычных пьезокерамических колебательных систем равна 16-18 кГц, а магнитострикционных колебательных систем 22 кГц. Для расчета возьмем среднее значение из этих частот, а именно 19 кГц.

$$Q_{\text{ак}} = 19000 \cdot 3.14 \cdot 5500000 \cdot 0,00001^2 = 32.8 \text{ Дж}/(\text{мм}^3 \cdot \text{с})$$

Так как удельная энергия намного больше, чем акустическая, при ультразвуковой сварки потребуется значительное вложение входной мощности. Поэтому в качестве преобразователя ультразвука эффективнее всего выбрать пьезокерамические кольца, которые могут обеспечить стабильную работу при мощностях выше 1 кВт [3].

В качестве пьезокерамического преобразователя был выбран восстановленный излучатель компании SONIC ITALIA Elm 40, который представлен на рисунке 30.



Рисунок 30 – Пьезокерамический преобразователь

Данный излучатель имеет выходную мощность равную 1 кВт и диаметр рабочего сечения 38 мм. Собственная частота колебаний составляет 20 кГц. Нижний электрод изготовлен из сплава Д16Т.

В основном, все ультразвуковые колебательные системы изготавливают либо из титанового сплава ВТ 3-1, либо из Д16Т. Так как

электрод излучателя выполнен из Д16Т, и свариваемая деталь имеет большой диаметр, целесообразно в качестве материала для всей колебательной системы выбрать именно Д16Т.

Как было сказано выше, пьезокерамические колебательные системы состоят из трех частей: излучатель, усилитель и волновод. Соответственно вторым этапом проектирования ультразвуковой колебательной системы является расчет ее усилителя, который будет увеличивать амплитуду колебаний.

Коэффициент усиления  $k$ , определяют по формуле:

$$k = \frac{D_{\text{входной}}}{D_{\text{выходной}}} \quad (6)$$

где  $D_{\text{входной}}$  – входной диаметр изделия;

$D_{\text{выходной}}$  – выходной диаметр изделия.

Так как излучатель имеет диаметр выходного сечения – 38 мм., и вся ультразвуковая колебательная система будет выполнена из одного материала, то выходной диаметр усилителя примем равный – 38 мм. Коэффициент усиления для многих пьезокерамических колебательных систем берут равный 1.5. Используя формула (6), найдем входной диаметр усилителя.

$$D_{\text{входной}} = k \cdot D_{\text{выходной}} = 1.5 \cdot 38 = 57 \text{ мм}$$

Теперь найдем резонансную длину усилителя по формуле:

$$l = \frac{nc}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln k}{\pi n}\right)^2}, \quad (7)$$

где  $n$  – целое число полувольт;

$c$  – скорость звука;

$k$  – коэффициент усиления.

Все колебательные системы могут быть или полуволновыми, когда  $n=1$ , или целно волновыми, когда  $n=2$ .

На практике обычно применяются только полуволновые системы, так как они меньше по размерам [15].

Скорость распространения звуковых волн в дюралюминиевых сплавах составляет 6400 м/с.

Подставим значения в формулу (7) и найдем  $l$ :

$$l = \frac{1 \cdot 6400000}{2 \cdot 20000} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln 1.5}{\pi \cdot 1}\right)^2} = 141 \text{ мм.}$$

Усилитель предназначен не только для увеличения амплитуды, он так же выступает частью, за которую вся колебательная система крепится в оснастке или корпусе пистолета. Для этого необходимо по формуле 2.5 найти сечение, в котором колебания будут равны нулю. Возле данного сечения будет спроектирован буртик крепления.

$$x_0 = \frac{l}{\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\pi} \ln k\right), \quad (8)$$

где  $k$  – коэффициент усиления;

$l$  – длина усилителя;

$x_0$  – расстояние от входного торца усилителя, до нулевого сечения.

$$x_0 = \frac{141}{\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\pi} \ln 1.5\right) = 70.3 \text{ мм.}$$

Дальше необходимо провести расчет волновода, учитывая размеры свариваемых деталей и усилителя.

Исходя из того что верхняя крышка корпуса клапана во время сварки должна плотно прижиматься к корпусу, в волноводе требуется предусмотреть углубление, которое должно позиционировать и прижимать крышку к корпусу клапана.

Крышка имеет внешний диаметр равный 47 мм., исходя из этого примем диаметр углубление в волноводе равным 48 мм. А внешний диаметр волновода на данном этапе примем равным 56 мм.

Резонансная длина цилиндрических волноводов, без усиления, находится по формуле [24]:

$$l = \frac{nc}{2f}, \quad (9)$$

где  $n$  – целое число полуволн;

$c$  – скорость звука;

$f$  – резонансная частота.

$$l_{\text{волновода}} = \frac{1 \cdot 6400000}{2 \cdot 20000} = 160 \text{ мм.}$$

После расчета длин и диаметров всех элементов колебательной системы, составляется ее первоначальный эскиз (рисунок 31), с соблюдением всех размеров.

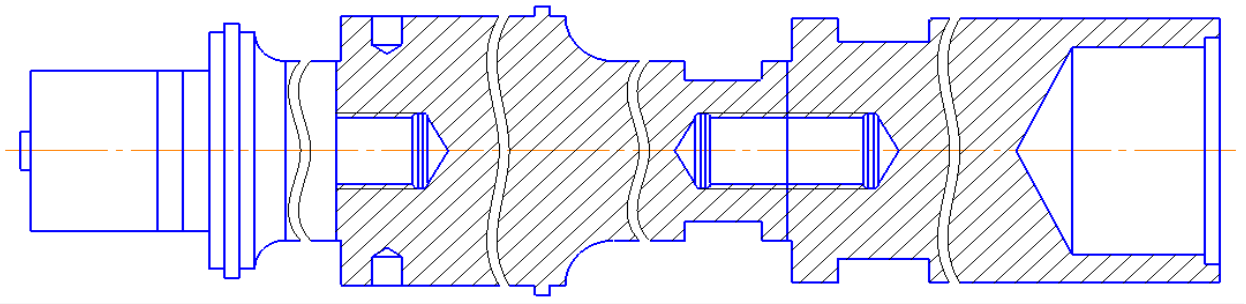


Рисунок 31 – Эскиз колебательной системы

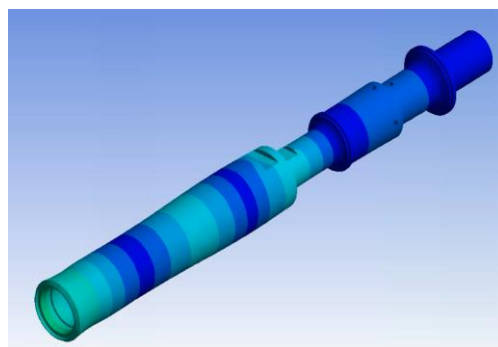
На эскизе прорабатываются различные пазы для ключей, фаски и радиусы, а так же резьбовые соединения.

Учитывая форму и размеры верхней крышки клапана адсорбера, в волноводе было спроектировано углубление.

Внося в первоначальный эскиз изменения, такие как: добавление пазов, углубления, резьбовые отверстия и так далее, мы уменьшаем массу ультразвуковой колебательной системы, и усложняем ее внутренние сечения. Эти факторы приводят к изменению акустических параметров самой системы.

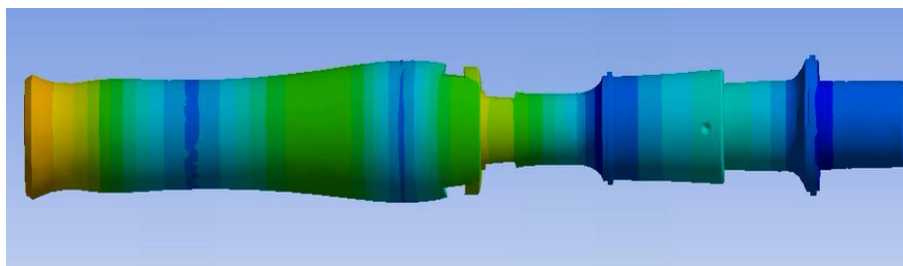
Чтобы увидеть, как сильно изменились акустические параметры колебательной системы, проводят модальный анализ, по результатам которого в эскиз вводятся необходимые изменения.

Результаты модального анализа представлены на рисунке 32:



а





б

а – в общей проекции, б – в горизонтальной проекции

### Рисунок 32 – Результаты модального анализа

После модального анализа и внесения корректировок, разрабатываются рабочие чертежи всех элементов ультразвуковой колебательной системы, по которым она и будет изготовлена.

На рисунке 33 представлено фото готовой ультразвуковой пьезокерамической колебательной системы для полуавтоматической приварки крышки к корпусу клапана адсорбера.



Рисунок 33 – Ультразвуковая колебательная система для сварки корпуса клапана адсорбера

### **2.2.2 Проектирование ультразвукового генератора**

Генератор для ультразвуковой сварки является одним из основных элементов любого комплекса. Он предназначен для настройки и регулирования режимов ультразвуковой сварки.

Немало важной функцией ультразвукового генератора является – поиск, захват и поддержание резонансной частоты колебательной системы, это необходимо, чтобы согласовать их друг с другом. Если генератор и

колебательная система не согласованы, то есть генератор выдает ток одной частоты, а колебательная система в данный момент времени имеет совершенно другую собственную частоту, то ультразвуковой сварки не произойдет.

Именно поэтому многие современные генераторы обладают автоматическими алгоритмами подстройки резонансной частоты, которые постоянно отслеживают собственные колебания колебательной системы, даже во время процесса сварки.

Следовательно, разрабатываемый генератор должен обеспечивать технические требования, которые приведены в таблице 5:

Таблица 5 – Технические требования генератора для ультразвуковой сварки

Наименование параметра	Значение
Напряжение питающей сети, В	220
Частота питающей сети, Гц	50
Ток подмагничивания, А	6
Мощность на выходе, Вт	600-1500
Выходная частота колебаний, кГц	16-45
Наличие АПЧ	да
Шаг сканирования АПЧ, Гц	5-100
Наличие электронного таймера	да

В ходе работ и благодаря команде электриков и программистов был разработан и создан ультразвуковой генератор «УЗГ-22-1-М», который удовлетворяет заявленным требованиям. Данный генератор представлен на рисунке 34:



Рисунок 34 – Ультразвуковой генератор

Данный генератор способен захватить и раскачать разработанную ультразвуковую колебательную систему на мощности в пределах 1 кВт.

Так же внутри генератора установлен дисплей, на котором в момент осуществления сварки отображаются значения мощности и резонансной частоты в режиме реального времени.

Генератор имеет возможность работать как в режиме автоматического поиска резонансной частоты, так и без него, когда значение частоты задается вручную, и генератора подает выходной ток строго заданной частоты.

### **2.3 Разработка методики исследования качества ультразвуковой сварке клапана адсорбера**

Исследования ультразвуковой сварки выполняли с целью, определения влияния параметров режима ультразвуковой сварки Технамида А-СВ-30-ТАФ на качество получаемого соединения.

Исследования проводили как непосредственно в условиях производства на ООО НПФ «Витал» при полуавтоматической сварке корпусов клапана абсорбера, так и в лабораторных условиях на базе Тольяттинского государственного университета.

В качестве оборудования использовали:

Разработанный ультразвуковой генератор УЗГ-22-1-М с диапазоном мощности от 0.6 до 1.5 кВт и диапазоном частоты колебаний от 16 до 44 кГц (рисунок 35):



Рисунок 35 – Ультразвуковой генератор УЗГ-22-1-М  
Ультразвуковую колебательную систему (рисунок 36):



Рисунок 36 – Ультразвуковая колебательная система

Данная ультразвуковая колебательная система выполнена на базе излучателя с пьезокерамическим преобразователем, который состоит из двух пьезокерамических шайб с внешним диаметром 38 мм. и толщиной 6.4 мм.

Усилитель и волновод изготовлены из сплава Д16Т.

Усилитель имеет коэффициент усиления равный 1.4.

Волновод предназначен для дистанционной сварки по замкнутому контуру.

Из-за ведения самоизоляции на фоне коронавирусной инфекции, было решено проводить лабораторные испытания непосредственно на базе ООО НПФ «Витал» с использованием всего необходимого оборудования.

В связи с этим, колебательная система и ультразвуковой генератор были размещены на базе полуавтоматического стенда для ультразвуковой сварки - SONIC ITALIA Elm 40 (рисунок 37), который уже имелся на базе ООО НПФ «Витал»:



Рисунок 37 - Стенда для ультразвуковой сварки - SONIC ITALIA Elm 40

Данный стенд состоит из ультразвукового генератора, который расположен под рабочей зоной, двух направляющих, на которых закреплен пневматический цилиндр с ультразвуковой колебательной системой, и ложементов под деталь.

В качестве образцов для проведения исследования в условиях производства выбрали электромагнитный клапан адсорбера, который состоит

из корпуса и крышки, выполненных из Технамида А-СВ-30-ТАФ. Внутри корпуса располагается электромагнитный клапан (рисунок 38).



Рисунок 38 - Клапан адсорбера в разобранном виде

Детальный осмотр образцов под микроскопом выполняли в лабораторных условиях.

Процесс ультразвуковой сварки происходил в полуавтоматическом режиме на следующих режимах:

- частота колебаний –  $20 \pm 0,5$  кГц;
- мощность на выходе –  $900 \dots 1000$  Вт;
- время сварки варьировали в диапазоне  $0,5 \dots 3$  с;
- сварочное усилие меняли в диапазоне  $3 \dots 6$  кгс/см<sup>2</sup>.



Контроль качества получаемых сварных деталей на первом этапе осуществляли визуально. После суток с момента сварки детали проходили испытания на герметичность.

Установка для испытаний была создана силами работников ООО НПФ «Витал», ее схема представлена на рисунке 39:

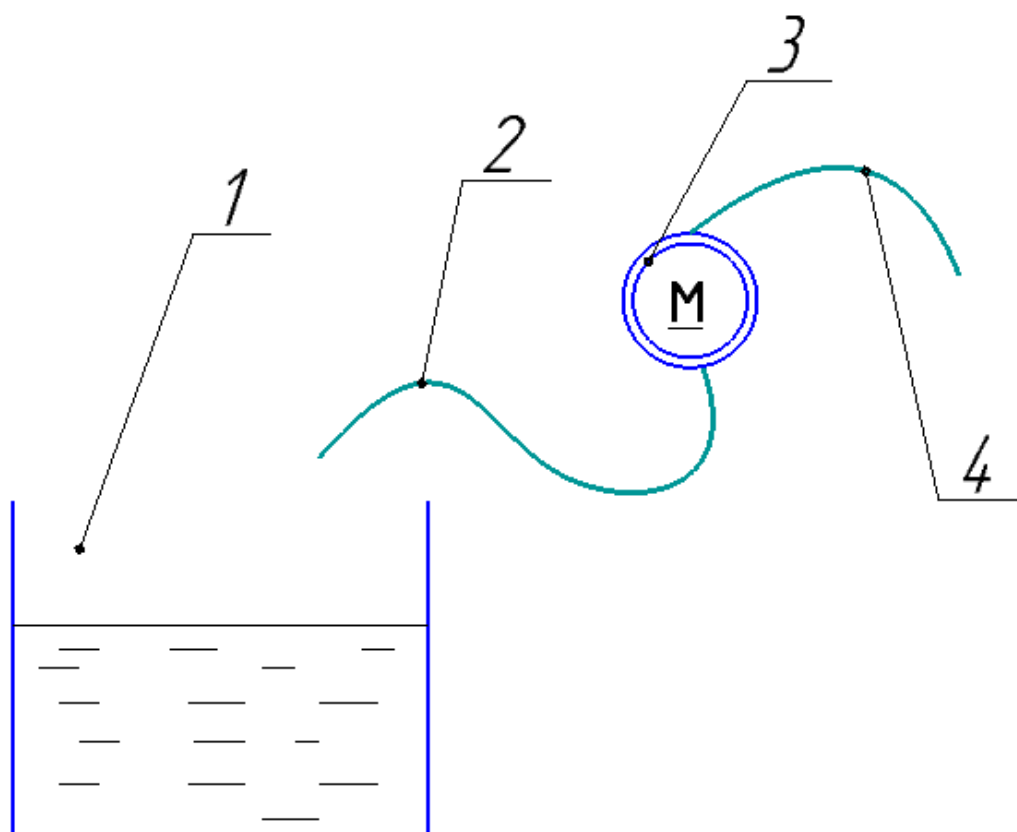


Рисунок 39 – Схема установки для проведения испытаний на герметичность клапана адсорбера

Данная установка имеет очень простую конструкцию и легка в использовании. Она состоит из емкости с водой 1, воздухоподводящих шлангов 2 и 4, а так же манометра 3.

Шланг 2 надевается на впускной штуцер электромагнитного клапана, затем клапан полностью погружается в воду. При помощи крана на манометре, осуществляется плавная подача воздуха внутрь клапана. Как только давление внутри клапана достигнет 4 атмосферы, подачу воздуха

прекращают, и обращают внимание на емкость с водой. Если на поверхности воды присутствуют пузырьки, значит, клапан не герметичен. Если пузырьков нет, то клапан прошел проверку и является годным [5].

### **Выводы по главе**

Были описаны материал, конструкция и условия эксплуатации выбранного объекта исследования, которым является клапан адсорбера.

Была спроектирована и изготовлена установка для проведения исследований, которая включает в себя ультразвуковую колебательную систему и ультразвуковой генератор.

Была разработана методика проведения исследования качества ультразвуковой сварке клапана адсорбера.

### 3 Анализ результатов исследований

#### 3.1 Анализ первичных результатов проведенных исследований

В ходе исследований было сварено 32 клапана адсорбера в сборе. Время сварки изменялось с 0.5 до 1.3 секунды, сварочное усилие – с 3 до 6 кгс/см<sup>2</sup>, мощность сварки не менялась и была равной 1 кВт.

Результаты первичных исследований представлены в таблице 6:

Таблица 6 – Результаты исследования

Время, с	Сварочное усилие кгс/см <sup>2</sup>			
	3	4	5	6
0,5	з	ж	ж	к
0,6	ж	к	ж	ж
0,7	ж	к	з	ж
0,8	ж	ж	ж	ж
0,9	ж	ж	ж	к
1	ж	ж	к	к
1,1	к	к	к	к
1,2	к	к	к	к
1,3	к	к	к	к

В таблице:

- зеленый цвет означает, что образец, сваренный на таких режимах, герметичен;
- желтый цвет – имеется одна или две локальные протечки;

– красный цвет – образец не герметичен по контуру.

По данным исследования были сделаны выводы, что избыточное давление и большое время сварки ухудшают герметичность корпуса. Причиной этого может быть то, что стеклонаполненный полиамид в момент подачи ультразвука и при воздействии сварочного усилия начинает рассыпаться. О чем свидетельствуют следы на оплавленной кромке корпуса, которая имеет шероховатую поверхность (рисунок 40).



Рисунок 40– Следы оплавления

Так же было замечено, что расплавленный пластик неравномерно заполняет зазор (рисунок 42). Следовательно, в некоторых местах прочность сварного соединения хуже. И именно там велик риск возникновения протечки.

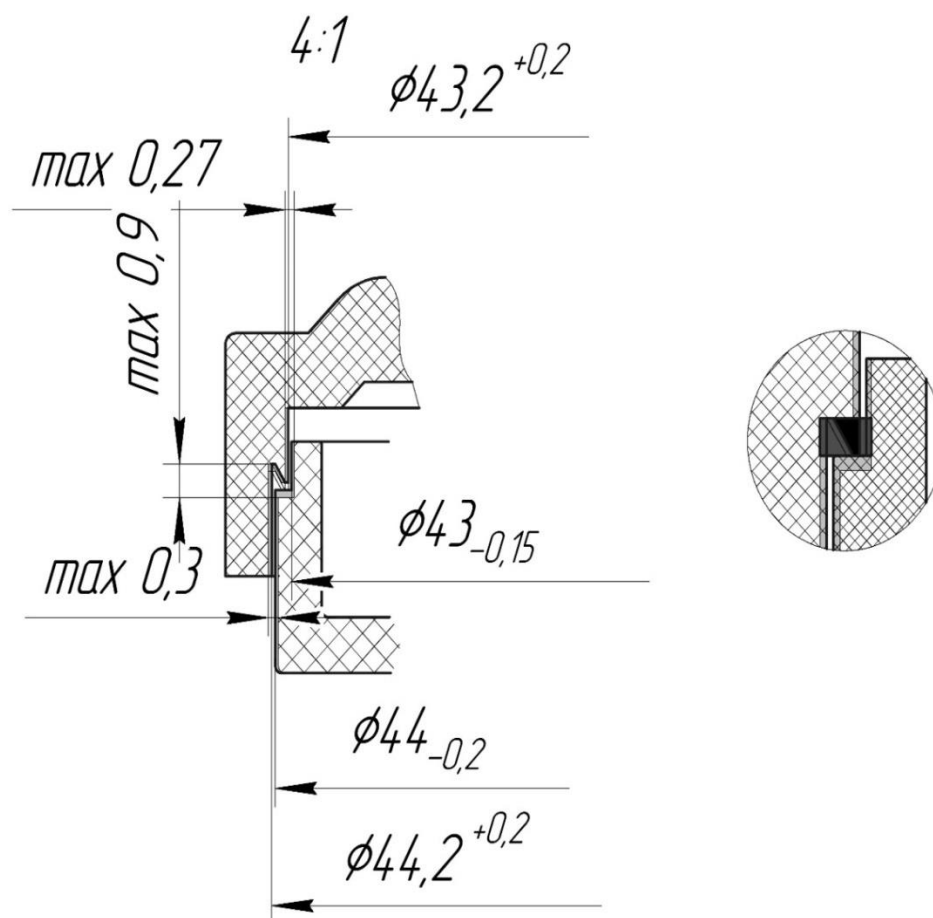


Рисунок 42 – Неравномерные следы оплавления

Было решено провести анализ зазоров, чтобы обеспечить равномерное распределение расплавленного пластика по соединению. После доработки формы изделий провести повторные исследования, так как первичные результаты не дают понимания истинной картины.

### 3.2 Доработка формы корпуса клапана

Анализ зазоров в собранном варианте с учетом допусков на размеры деталей (выделены серой заливкой на рисунке 43) показывает, что площади расплавляемого материала зубца (выделено черной заливкой на рисунке 43 справа) не достаточно, чтобы перекрыть все возможные зазоры.



### Рисунок 43 – Зазор между крышкой и корпусом клапана адсорбера

Исходя из анализа зазоров, было предложено уменьшить размер зубца крышки клапана адсорбера по вертикали.

Учитывая объем расплавленного зуба и минимальный зазор при усадке крышки клапана относительно корпуса после ультразвуковой сварки, обеспечивающий надежный прижим уплотнительного кольца на электромагнитном датчике, который находится внутри корпуса клапана, было решено сделать зуб высотой 0.5 миллиметров.

Эскиз зуба представлен на рисунке 44.

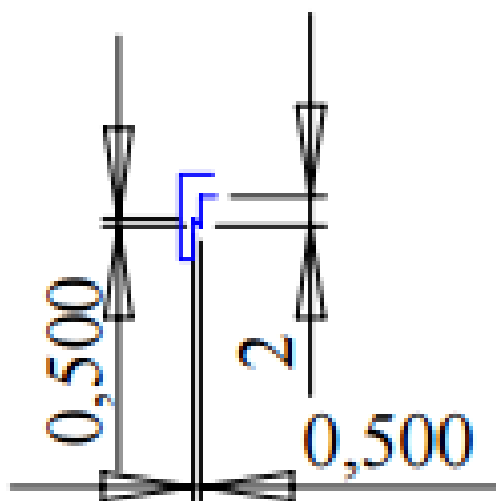


Рисунок 44 – Эскиз зуба крышки клапана адсорбера после анализа зазоров

### 3.3 Анализ вторичных результатов проведенных исследований

В ходе первичных исследований было отмечено, что при времени сварки больше 1 секунды и при сварочном усилии больше 5 кгс/см<sup>2</sup> риск того, что расплавленный пластик вытечет за пределы свариваемых кромок возрастает.

Испытания на герметичность показывают, что в местах выплесков пластика почти всегда обнаруживается протечка. Это связано с тем, что

расплавленный пластик продолжает свое движение по зазору и прилипает к более холодным краям. Тем самым, не заполняя зазор, а так сказать, размазывается по его стенкам или застывает посередине или на крае зазора, формируя сгусток, который имеет не прочное соединение с основным материалом.

В связи с выше сказанным, повторные испытания было решено проводить при времени сварки от 0.5 до 1 секунды и сварочном усилии от 3 до 5 кгс/см<sup>2</sup>.

Результаты исследований корпусов с доработанной формой приведены в таблице 7:

Таблица 7 – Результаты исследования

Время, с	Сварочное усилие кгс/см <sup>2</sup>		
	3	4	5
0.5	к	ж	ж
0.6	ж	к	ж
0.7	ж	ж	з
0.8	ж	ж	ж
0.9	з	ж	к
1	ж	к	к

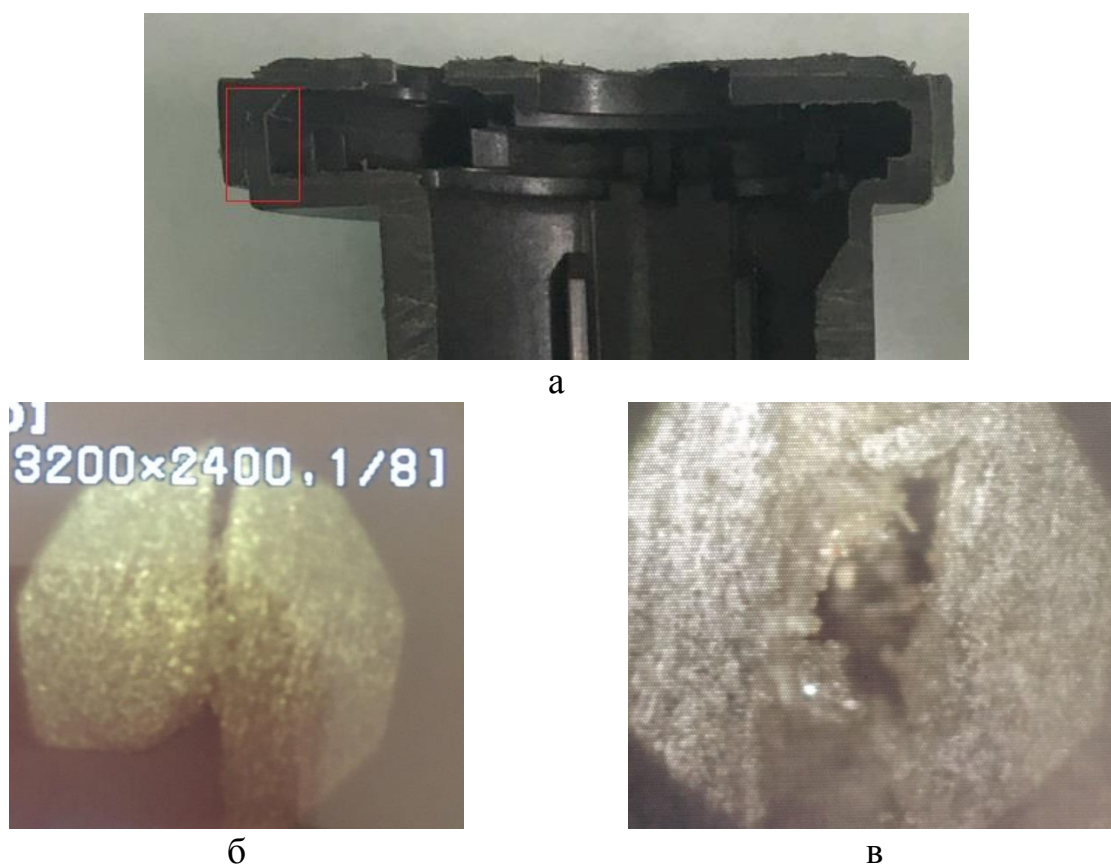
Учитывая опыт первичных исследований, было решено сварить дополнительно по 5 образцов на режимах:

- время – 0.9 секунды, усилие – 3 кгс/см<sup>2</sup>;
- время – 0.7 и 0.8 секунды, усилие – 4 кгс/см<sup>2</sup>;
- время – 0.7 секунды, усилие – 5 кгс/см<sup>2</sup>.

В ходе проверки дополнительно сваренных образцов на всех четырех режимах, лишь некоторые детали обеспечивали герметичность корпуса.

Было принято решение провести детальный анализ образцов. В ходе, которого было обнаружено, что в сварном шве при сварке образуются поры, края которых имеют кристаллообразную структуру, что свидетельствует о наличии на их границах стеклянного наполнителя.

На рисунке 45 представлены снимки пор, возникающих в сварном шве, под разным увеличением.



а-пора без увеличения, б-четырёх кратное увеличение, в-десяти кратное увеличение

Рисунок 45 – Поры под разным увеличением

Проанализировав форму и расположение пор, можно предположить, что стеклянный наполнитель под воздействием высокочастотных колебаний начинает перемещаться в расплавленном пластике, тем самым образуя участки наибольшего скопления. Так как температура плавления наполнителя намного выше, чем у основного материала, стеклянные частички начинают выступать в роли первых очагов кристаллизации пластика. Более того они могут выступать в качестве армирующего материала, то есть создавать области укрепленные стекловолокном. Под действием ультразвуковых колебаний из данной области расплавленный пластик вытекает в зазор. В результате чего образуется пора.



Дабы избежать возникновения пор, которые ослабляют сварное соединение, было решено изменить циклограмму сварочного усилия.

Как известно, пневматический цилиндр оказывает большое усилие за короткий промежуток времени, которое не изменяется со временем. Чтобы избежать возникновения пор необходимо оказывать сварочное усилие постепенно, чтобы расплавленный пластик плавно затекал в зазор.

Результаты исследований с плавным оказанием сварочного усилия приведены в таблице 8:

Таблица 8 – Результаты исследования

Время, с	Сварочное усилие кгс/см <sup>2</sup>		
	3	4	5
0.5	к	ж	ж
0.6	ж	ж	ж
0.7	з	з	з
0.8	з	з	ж
0.9	з	ж	к
1	ж	к	к

Доработав форму торцов крышки и корпуса, а так же изменив циклограмму оказания сварочного усилия, удалось обеспечить герметичность получаемых образцов.

### **Выводы по главе**

Был произведен анализ результатов исследований, в ходе которого обнаружилась необходимость произвести доработку формы свариваемых кромок изделия.

Был произведен анализ зазоров и найдена оптимальная форма кромок, обеспечивающая полное заполнение зазора расплавленным пластиком.

Были произведены повторные испытания сваренных образцов с доработанной формой.

## 4 Разработка комплекса для ультразвуковой сварки корпуса адсорбера

### 4.1 Проектирование привода для ультразвуковой сварки

Для перемещения ультразвуковой колебательной системы в вертикальном положении, то есть при рабочем ходе, предлагается применять в качестве приспособления линейного перемещения - пневматический привод, который бы обладала возможностью установки на него числового программного управления, тем самым повышая уровень автоматизации процесса и упрощая его.

Привод линейного позиционирования для вертикальных рабочих перемещений изображен на рисунке 46.

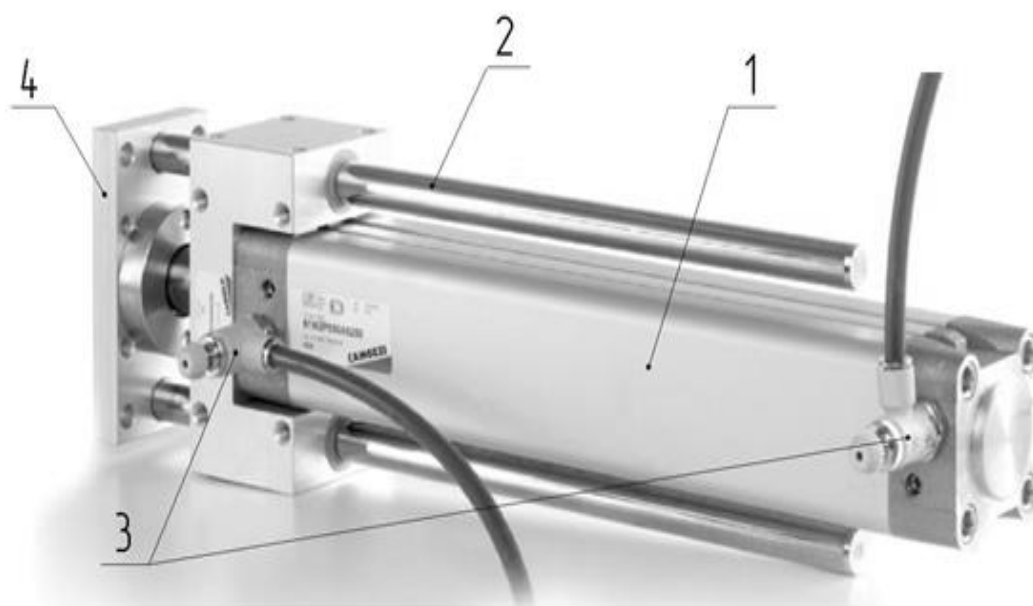


Рисунок 46 – Общий вид привода

Данный привод состоит из самого пневматического цилиндра 1, двух профильных направляющих промышленного класса для передвижения 2, двух подводов воздуха 3 и фланца крепления 4.

Так же данный привод оснащен пневматическим цилиндром с регулировкой силы прижима и скорости передвижения.

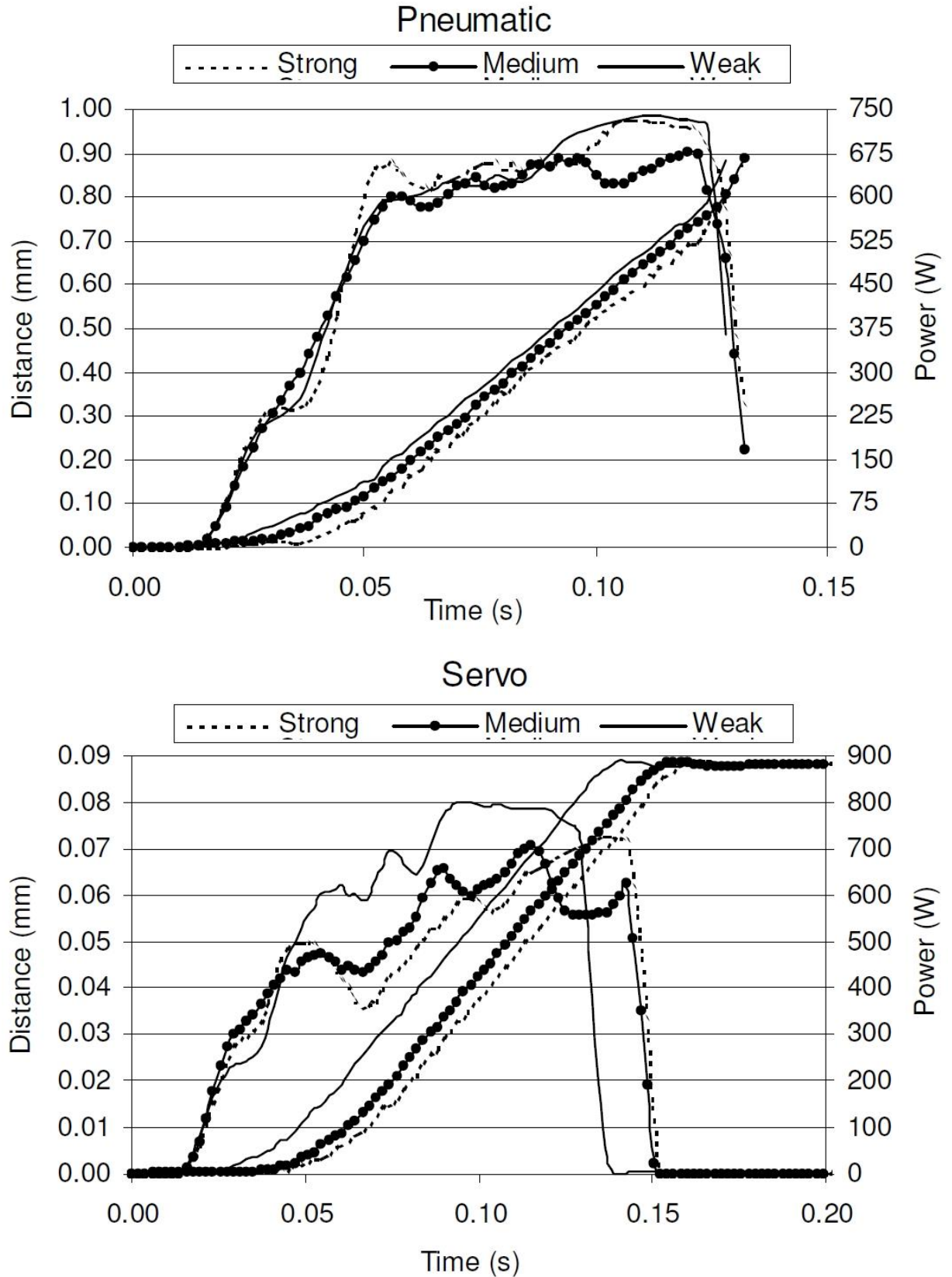
На фланце легко можно будет надежно закрепить разработанную ультразвуковую колебательную систему. А направляющие Hiwin обеспечат с отличной точностью и быстротой надежное перемещение каретки с ультразвуковой колебательной системой между верхнем и нижнем положениями работы комплекса.

На верхней части электромагнитной катушки, которая располагается внутри корпуса клапана адсорбера, присутствуют две уплотнительные резинки. Следовательно, в процессе сварки возникает необходимость поджимать крышку к корпусу клапана. Пневматический цилиндр является одним из лучших и простых узлов, чем другие подобные устройства, предназначенные для перемещения и поджима заготовок.

Пневматический цилиндр для разрабатываемого комплекса должен иметь магнитный поршень и корпус из алюминия. Все это необходимо для того чтобы была возможность разместить на нем регулируемые концевые датчики. Концевые датчики, в свою очередь, должны быть соединены с общей платой системы числового программного управления, то есть контроллером станка, который будет соединен с платой управления уже самого ультразвукового генератора.

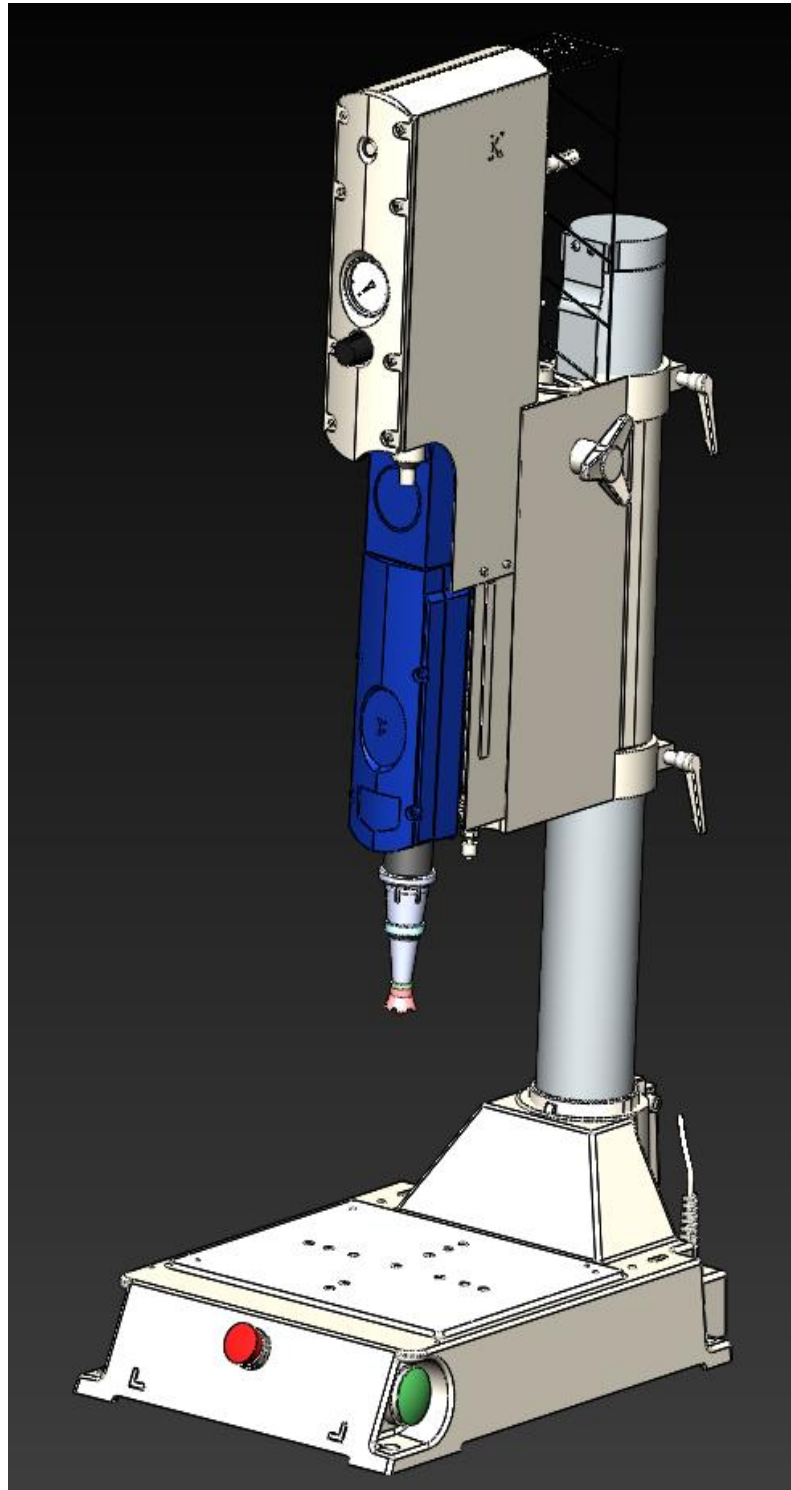
В данный момент пневматические цилиндры и серво двигатели стоят на одном уровне по характеристикам работы. Правда пневматические цилиндры намного проще и надежнее, что делает их незаменимыми узлами в разработке конструкций для различных поступательных и вращательных механизмов. Более того у пневматического цилиндра нет такого недостатка, как неучтенный пропуск шагов двигателя при высоких нагрузках.

Так же системы с применением пневматических цилиндров не подвержены перегреву при работе, в отличии от серво двигателей. На рисунке 47 показаны графики сравнения характеристик работы пневмо и серво приводов:



## Рисунок 47 Графики сравнения пневмо и серво приводов

Для понимания процесса сборки приведем модель будущего экспериментального стенда (рисунок 48) и опишем его принцип работы.



## Рисунок 48 – Модель разрабатываемого комплекса для ультразвуковой сварки крышки к корпусу клапана адсорбера

Опишем принцип работы данного оборудования:

Для начала на нижний стол комплекса устанавливается ложемент, который фиксируется к нему при помощи болтов. Ложемент, в свою очередь, имеет отверстие с уступами для крепления и позиционирования корпуса клапана.

В нашем случае предпочтителен вертикальный рабочий ход комплекса, так как верхняя крышка клапана под собственным весом располагается на корпусе. Тем самым обеспечивает предварительную сборку, а следовательно, применение различных дополнительных зажимов и фиксирующих приспособлений в технологию не требуется.

В ложемент перед сваркой устанавливают корпус клапана, затем в него помещают электромагнитную катушку и сверху закрывают крышкой.

Далее нажав одновременно две кнопки на рабочем столе, запускаем программу. Колебательная система опускается к предварительно собранным элементам клапана. В процессе первого пуска можно отрегулировать скорость подачи и усилие, оказываемое волноводом на детали. Так же при первом запуске можно убедиться в точности позиционирования всех элементов относительно друг друга.

Отрегулировав концевые датчики, мы можем переходить к проведению испытаний. Сваривая образцы на разных режимах ультразвуковой сварки. Затем проводим испытания сваренных деталей и делаем рекомендации для массового выпуска данной продукции.

### **4.2 Разработка технологического процесса ультразвуковой сборки адсорбера**

Крышка, корпус и электромагнитный датчик клапана поступают на сборочно-сварочный участок в специальных ящиках. На электромагнитной катушке уже присутствуют уплотнительные резиновые кольца.

Процесс ультразвуковой сборки корпуса клапана адсорбера начинается с входного контроля. Задачей данного процесса является проверить крышку и сам корпус на предмет дефектов. В случае наличия дефекта, элемент клапана бракуется и отправляется на переработку. Электромагнитные катушки проверяются на специальном оборудовании до прихода на сборочный участок.

После проверки осуществляется сборка. В ложемент, который повторяет форму детали, устанавливается корпус клапана. Затем внутрь корпуса с помощью направляющих вставляется электромагнитная катушка. После чего сверху надевается крышка клапана и придавливается с двух сторон вручную.

Затем осуществляется проверка выбранных режимов ультразвуковой сварки и осуществляется сама сварка (рисунок 49)

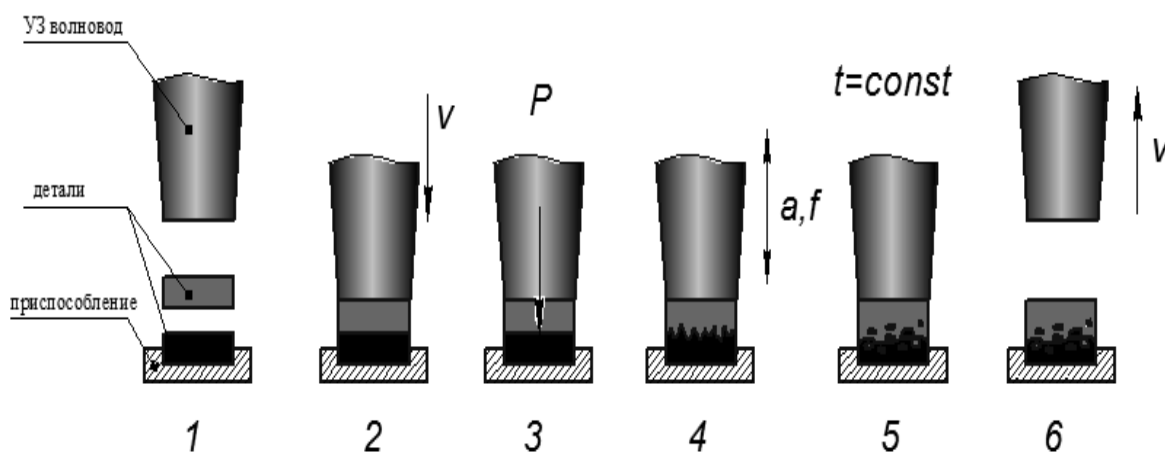


Рисунок 49 –Схема цикла ультразвуковой сварки

Процесс сварки начинается после нажатия одновременно двух кнопок на нижнем столе станка. В этот момент привод начинает опускать колебательную систему до нижнего рабочего положения.

Как только колебательная система достигает нижнего рабочего положения, срабатывает концевой датчик, который запускает ультразвуковой генератор. В это же время пневматический цилиндр осуществляет оказание усилия на свариваемые детали (рисунок 50).

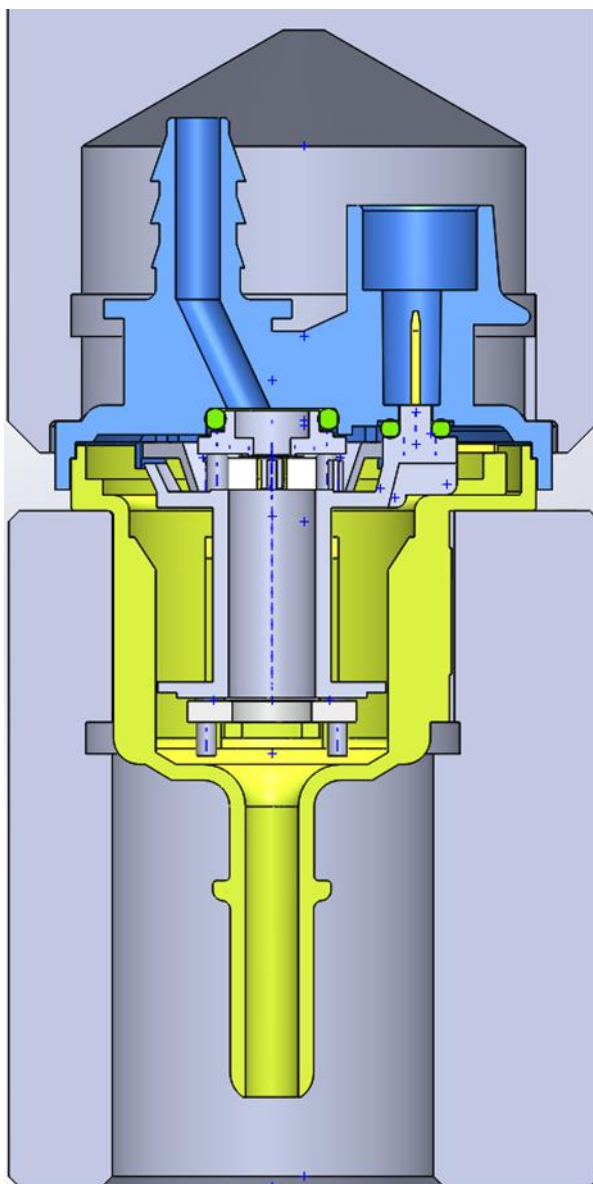


Рисунок 50 – Расположение волновода и деталей в момент сварки



Как только ультразвуковой генератор определит собственную частоту колебательной системы, начнется процесс ультразвуковой сварки. В это же момент запустится таймер, который по истечению определенного времени отключит ультразвуковой генератор.

После выключения подачи ультразвука, пневматический цилиндр сохраняет сварочное усилие неизменным в течении 5 секунд. Затем поднимает колебательную систему в верхнее рабочее положение.

Оператор вынимает сваренный электромагнитный клапан из ложементта и убирает в ящик с готовой продукцией.

Испытания на герметичность проводятся спустя сутки после сварки.

### **Выводы по главе**

В результате анализа результатов исследования, было выявлено, что плавное оказание сварочного усилия в процессе ультразвуковой сварки, благоприятно влияет на получение полностью герметичного изделия.

Был разработан технологический процесс ультразвуковой сборки клапана адсорбера.

## Заключение

В магистерской диссертации разработана методика и оборудование для проведения исследований по ультразвуковой сварке прессового типа корпуса клапана адсорбера. Проанализировав результаты, были сделаны следующие выводы:

- чрезмерно большое усилие и время сварки приводят к вытеканию расплавленного пластика из зазора, что приводит к образованию протечки в местах выплесков;
- под длительным воздействием ультразвуковых колебаний Технамид начинает рассыпаться;
- разделка кромок при дистанционной сварке жестких пластиков напрямую влияет на герметичность конструкции, и в малой степени влияет на прочность полученного соединения;
- полная герметичность может быть обеспечена, когда объем расплавляемого зуба при расплавлении полностью заполняет все возможные зазоры, не приводя к выплескам материала;
- при ультразвуковой дистанционной сварке Технамида, стеклянный наполнитель выступает в роли первых очагов застывания пластика, а так же в роли армирующего волокна. Оба эти фактора приводят к образованию пор в сварном соединении, что нарушает герметичность изделия;
- плавное оказание сварочного усилия в процессе сварке уменьшает возможность образования пор и обеспечивает наилучшую герметичность соединения.

В ходе работы были найдены оптимальные режимы ультразвуковой дистанционной сварки корпуса клапана адсорбера, которые обеспечивают полную герметичность изделия. Так же был разработан полуавтоматический стенд для сборки клапана. И написан технологический процесс.



## Список используемых источников

1. Klamecki, B.E. A Thermodynamic Model of Friction / B.E. Klamecki // Wear, 1980. №2. С. 113 – 120.
2. Klamecki, B.E. Guide to Ultrasonic Plastics Assembly/ B.E. Klamecki // Dukane Part, 2011. С. 101 – 120.
3. Kirkland, T. Ultrasonic Welding: The Need for Speed Control/ T. Kirkland - Plastics Decorating, 2012.
4. Leaversuch, R.C. How to Use those Fancy Ultrasonic Welding Controls/ R.C. Leaversuch // Plastics Technology. 2002.
5. Slivin, A.N. Theoretical investigations of continuous ultrasonic seam welding of thermoplastic polymers and fabrics/A.N. Slivin - Russian Foundation for Basic Research (RFBR). – Altai, 2010. – P. 341–344.
6. Адсорбер. Что это такое в машине, для чего нужен, на что влияет и какие основные признаки неисправности [Электронный ресурс]. URL: <http://avto-blogger.ru/dv/adsorber-что-это-такое-в-машине.html> (дата обращения: 13.10.2020).
7. Вероман, В.Ю. Библиотечка электротехнолога Выпуск 4 / В.Ю. Вероман, А.Б. Аренков - Л.: Машиностроение, 1971. – 168 с.
8. Волков, С.С. Влияние разделки кромок на свариваемость пластмасс при ультразвуковой сварке / С.С. Волков // Сварочное производство. 2013, № 4. С. 24–27.
9. Волков, С.С. Особенности теплообразования при ультразвуковой сварке жестких пластмасс / С.С. Волков, С.А. Королев, Д.С. Розанов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. №4. С. 27-34.
10. Волков, С. С. Применение пластмасс / С. С. Волков, Р. Г. Яматов - М.: 1979. № 17. С. 41—48.
11. Волков, С.С. Сварка пластмасс ультразвуком. 2-е изд., перераб. и доп. / С.С. Волков, Б.Я. Черняк – М.: Химия, 1986. – 256 с.

12. Высокотехнологичные и инженерные пластики для нефтяной и газовой промышленности [Электронный ресурс]. URL: [https://polimer1.ru/assets/files/downloads/catalog/neft\\_and\\_gaz\\_elmika.pdf](https://polimer1.ru/assets/files/downloads/catalog/neft_and_gaz_elmika.pdf) (дата обращения: 22.03.2020).

13. Закат эпохи стали, почему мы скоро увидим пластиковый автомобиль [Электронный ресурс]. URL: <https://www.forbes.ru/biznes/347665> (дата обращения: 20.03.2020).

14. Использование пластмасс в химической промышленности [Электронный ресурс]. URL: <https://starorushimmash.ru/ispolzovanie-plastmass-v-ximicheskoy-promyshlennosti.html> (дата обращения: 20.03.2020).

15. Кардашев, Г.А. Теплообменные акустические процессы и аппараты / Г.А. Кардашев, П.Е. Михайлов - М.: Машиностроение, 1973. – 223 с.

16. Ковтунов, А.И. Исследование структуры наплавленных купридов титана / А.И. Ковтунов, Н.Г. Спиридонов, // Технологическое развитие: тенденции, проблемы и перспективы. 2020. С. 41 – 46.

17. Марочный ассортимент композиционных материалов [Электронный ресурс]. URL: [http://polimpartner.by/wp-content/uploads/2018/09/Katalog\\_na\\_marochnyj\\_assortiment.pdf](http://polimpartner.by/wp-content/uploads/2018/09/Katalog_na_marochnyj_assortiment.pdf) (дата обращения: 13.10.2020).

18. Обзор мировой полимерной индустрии [Электронный ресурс]. URL: [https://polyprofi.ru/blogs/Blog\\_Poly\\_and\\_Pro/obzor-mirovoy-polimernoy-industrii.php](https://polyprofi.ru/blogs/Blog_Poly_and_Pro/obzor-mirovoy-polimernoy-industrii.php) (дата обращения: 20.03.2020).

19. Особенности экструзионного способа сварки различных полимеров [Электронный ресурс]. URL: <https://prosvarku.info/tehnika-svarki/ehkstruzionnyj-sposob-svarki> (дата обращения: 10.04.2020).

20. Пластмассы и их применение в промышленности [Электронный ресурс]. URL: [https://metallichekiy-portal.ru/articles/ximprom/plastmassi\\_i\\_ix\\_primenenie\\_v\\_promishlennosti](https://metallichekiy-portal.ru/articles/ximprom/plastmassi_i_ix_primenenie_v_promishlennosti) (дата обращения: 20.03.2020).

21. Применение конструкционных пластиков в нефтегазовой промышленности [Электронный ресурс]. URL: <http://plastpsk.ru/oil.html> (дата обращения: 20.03.2020).

22. Применение пластмасс взамен металла [Электронный ресурс]. URL: [https://bstudy.net/636866/ekonomika/primenenie\\_plastmass\\_vzamen\\_metalla](https://bstudy.net/636866/ekonomika/primenenie_plastmass_vzamen_metalla) (дата обращения: 22.03.2020).

23. Скипор, И.В. Отчет Greenpeace о пластиковом загрязнении берегов водных объектов в России / И.В. Скипор – М.: 2020. С. 4 – 8.

24. Теумин, И.И. Ультразвуковые колебательные системы/ И.И. Теумин - М.: Машиностроение, 1959. – 332 с.

25. Технические пластики для нефтегазовых технологий [Электронный ресурс]. URL: <http://elmica.ru/assets/files/technicheckie-plastiki-dlya-neftegazovqx-technologii.pdf> (дата обращения: 22.03.2020).

26. Технология сварки нагретым инструментом полиэтиленовых труб [Электронный ресурс]. URL: <https://infopedia.su/10xd6cb.html> (дата обращения: 10.04.2020).

27. Технология сварки пластмасс нагретым газом [Электронный ресурс]. URL: [https://asv0825.ru/svarka\\_plastmass/10.html](https://asv0825.ru/svarka_plastmass/10.html) (дата обращения: 10.04.2020).

28. Ультразвуковое оборудование [Электронный ресурс]. URL: <https://www.herrmannultrasonics.com/en-us/> (дата обращения: 12.05.2020).

29. Ультразвуковое оборудование [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dukane.eu/en/> (дата обращения: 12.05.2020).

30. Ультразвуковое оборудование [Электронный ресурс]. URL: <http://www.petsonic.ru> (дата обращения: 12.05.2020).

31. Холопов, Ю. В. Машиностроение: ультразвук: УЗС, БУФО, ГЕО / проф. Ю. В. Холопов. — Санкт-Петербург: ООО «Типография «Береста», 2008. -328 с.

32. Шестель, Л.А. Многоточечная ультразвуковая сварка конструкций из жёстких пластмасс / Л.А Шестель, Ю.А. Саяпин, В.А. Соколов // Машиностроение и машиноведение. 2014. №2. С. 99-101.