

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 металлов давлением и родственные процессы  
(наименование)

22.04.01. Материаловедение и технологии материалов  
(код и наименование направления подготовки)

Инжиниринг перспективных материалов и диагностика поведения  
материалов в изделиях  
(направленность (профиль))

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Повышение качества ультразвуковой точечной сварки в АО  
"АВТОВАЗ"

Обучающийся

Н.Г.Сильвестров

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный

руководитель

д.т.н., профессор Г.В.Клевцов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

## Содержание

Введение .....	3
1 Анализ исходных данных .....	6
1.1 Анализ назначения дверных обивок .....	9
1.2 Общие сведения о пластмассах .....	14
1.3 Анализ автоматизированного цикла сварки.....	21
1.4 Анализ принципа ультразвукового оборудования.....	25
1.5 Анализ значения соноотродов в ультразвуковой сварке.....	33
1.6 Анализ материалов соноотродов для ультразвукового оборудования .....	36
1.7 Анализ разрушения твердых тел при циклических нагрузках.....	45
1.8 Анализ разрушения соноотродов.....	49
2 Разработка методики для проведения исследования на оборудовании.....	53
2.1 Определение объекта исследования.....	53
2.2 Описание эксперимента на сварочной машине.....	56
3 Анализ результатов исследования.....	59
3.1 Результаты работоспособности соноотродов .....	59
3.2 Анализ полученных результатов.....	65
Заключение .....	67
Список используемой литературы .....	68

## Введение

Сегодня одним из наиболее перспективных направлений в обработке материалов становится применение физико-технических методов, позволяющих значительно увеличить производительность и качество изделий [1]. Мощные ультразвуковые колебания нашли широкое применение в промышленности, а также в научных исследованиях для изучения физических явлений и свойств материалов. Одним из интересных направлений является использование такого явления, как ультразвук в сфере связанной с сварочной технологией. Для примера рассмотрим процесс сварки, воздействуя ультразвуковыми колебаниями на сварочный шов непосредственно в процессе кристаллизации, удастся существенно повысить механические характеристики сварного соединения. Это достигается путем измельчения структуры металла шва и удаления газовых включений. Таким образом, улучшаются прочность и долговечность соединений [2]. Ультразвук помогает снизить или даже устранить внутренние напряжения и деформационные процессы, характерные для процесса сварки, хотя и в момент напряжения, нагрева и деформации элементы пластиковых деталей взаимодействуют и уменьшение деформационных аспектов очень важно для рассмотрения и понимания физики процесса ультразвуковой сварки в данной диссертационной работе [1].

Особенно перспективным направлением является ультразвуковая сварка (УЗС). Этот метод получил значительное распространение как в отечественной практике, так и за рубежом в последние годы. Ультразвуковая сварка позволяет создавать прочные и надежные соединения из пластиковых соединений с минимизацией негативных последствий термического воздействия. Одним из ярких примеров такой технологии выступает ультразвуковая сварка, активно внедряемая в различных отраслях промышленности и автомобилестроении [26]. Ультразвуковая сварка представляет собой инновационный способ соединения материалов путем преобразования электрического тока в передачу высокочастотных механических колебаний в диапазоне от 20 кГц до 100 кГц

непосредственно через тело соединяемых элементов конструкции ультразвуковых комплексов и машин. Механизм процесса заключается в следующем: ультразвуковые волны создают интенсивное трение поверхностей, трение в свою очередь вызывает локальное повышение температуры в точке соприкосновения и деформацию материала в процессе сдавливания и создании сварного соединения или шва. В результате процесса ультразвуковой сварки возникает прочное соединение пластиковых элементов конструкции благодаря образованию межмолекулярных связей пластиковых деталей, которое по прочности скрепляемых узлов не уступит процессу, при котором элементы при отливке создают общую форму, и это является еще одним большим плюсом данного процесса, который позволяет упростить процесс отливки и формирования деталей в пресс формах, так как разработка матрицы и формы очень дорогой и долгий процесс, ультразвуковая сварка позволяет в достаточной степени уменьшить затраты на себестоимость узла или комплектующего изделий, что в свою очередь позитивно повлияет на конечную стоимость получаемого продукта, чем ниже цена, тем выше спрос, в машиностроении это очень высокий показатель [1].

Так же хочу подчеркнуть еще одно главное достоинство ультразвуковой сварки является её высокая экологическая безопасность для окружающей природы и человека при производстве, это очень ощутимо, если сравнивать традиционные способы сварки часто сопровождаются образованием вредных веществ, таких как газообразные примеси и аэрозоли, негативно влияющие на здоровье рабочих сварщиков и окружающую среду или такой способ как склеивание деталей при помощи клеевых основ, которые в свою очередь имеют куда больше опасных примесей опасных как для человека, так и для окружающей среды. Ультразвуковая технология сварки пластиковых элементов практически не выделяет загрязняющих веществ и опасных элементов, что делает её идеальной для условий ограниченных производственных площадей и закрытых производственных цехов, где крайне важно соблюдать условия труда для работников предприятия и меры по сохранению окружающей среды [2].

«Высокий темп развития машиностроения не позволяет останавливаться на достигнутом и такой процесс как ультразвуковая сварка становится именитым методом для создания соединений и сегодня она занимает большую долю всех соединений из-за ряда преимуществ. Технология ультразвуковой сварки также экономит время и энергию: процесс сварки обычно длится всего несколько секунд, затраты на энергию минимальны, так же оправдывает себя как на крупных производствах, так и на небольших предприятиях, нацеленных на высокую эффективность и быстрый переход на различные комплектующие при модернизации и обновлении» [1]. Основные компании поставщики уже сейчас ведут работу по изготовлению пред-серийных деталей, уже с планом действий по унификации под ультразвуковую сварку деталей интерьера из пластика. [1], в том числе и такой автомобильный гигант как АО «АВТОВАЗ».

Что бы понять выбор объекта исследования в повышении качества УЗ-сварки, нужно подробно познакомиться с принципом УЗ-сварки на примере процесса ультразвуковой сварки облицовок дверей автомобиля «LADA VESTA NG» на Тольяттинском предприятии АО «АВТОВАЗ». При перемещении части производства из ООО «ЛАДА Ижевск» на Тольяттинскую производственную площадку АО «АВТОВАЗ» прошли определенные процессы пусконаладки и в ходе эксплуатации данных ультразвуковых сварочных комплексов были выявлены некоторые проблемы, связанные с качеством ультразвуковой сварки на предприятии, так как качество напрямую влияет на имидж бренда, данное исследование является актуальным и важным в исследовании и из этого можно сформировать цель.

Цель данной работы —повышение качества ультразвуковой сварки, путем внедрения новых проектов в производстве пластмассовых изделий АО «АВТОВАЗ».

## 1. Анализ исходный данных

Исследовательскую работу начнем с знакомством с таким автогигантом как АО «АВТОВАЗ», и углублённо изучим работу производства пластмассовых изделий (Рисунок 1) является структурным подразделением АО «АВТОВАЗ» и находится в границах основной производственной площадки автогиганта.



Рисунок 1 – Производство пластмассовых изделий (ППИ)

Нынешнее производство – является одним из крупнейших предприятий в Европе и бывшем СССР по выпуску крупногабаритных пластмассовых деталей для автомобилей.

Если немного окунуться в цифры, то по подсчетам площадь всех цехов около: 86 400м<sup>2</sup>. В ППИ эксплуатируются 580 единиц основного технологического оборудования рисунок 2.



Рисунок 2 – Производства пластмассовых изделий (ППИ)

«Интересной датой является 27 ноября 1995 года вышел приказ № 400 «О создании производства пластмассовых изделий и пресс-форм», подписанный президентом-генеральным директором АО «АВТОВАЗ» на тот момент президентом являлся Каданников В.В., эта дата по сей день, остается в памяти, как: Днем рождения ППИ.

Технологические процессы, применяемые в ППИ: литье пластмассовых деталей, термоформование, выдувка, ультразвуковая сварка, вибросварка, окраска и сборка.

Основная номенклатура: бамперы тисненные и окрашенные в цвет кузова согласно гамме цветовых решений производственной линии, панели приборов, обивки дверей и входящие детали, другие детали экстерьера и интерьера автомобилей, бачки омывателя и воздуховоды, накладки дверей и полки багажника» [32], примеры изображены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Номенклатура Производства пластмассовых изделий (ППИ)

В структуре ППИ четыре основных подразделения — производство литья и сборки пластмассовых изделий, производство окраски, служба руководителя по инжинирингу и управление по качеству.

Проект по переводу производства ультразвуковой сварки обивок дверей автомобиля «LADA VESTA NG» с Ижевской площадки ООО «ЛАДА Ижевск» на территорию Производства пластмассовых изделий (ППИ) АО «АВТОВАЗ» в 2022 году сыграл ключевую роль в улучшении технологических процессов и обеспечении высокого качества выпускаемых изделий. Данный проект являлся важной составляющей масштабной программы модернизации производства и направлен на внедрение передовых методик и стандартов в автомобилестроении.

Процесс переноса технологии и оборудования позволил решить ряд существенных вопросов, связанных с повышением качества и долговечностью используемых компонентов. Важность перехода объясняется несколькими факторами:

- Повышение устойчивости к внешним факторам, таким как влажность и температурные условия.

- Улучшение эргономики и дизайна интерьера автомобиля.
- Оптимизация затрат на производство за счёт сокращения сроков и стоимости ремонта повреждений внутренних панелей.

При данном переносе части Ижевского производства из ООО «ЛАДА Ижевск» на Тольяттинское производство на площади АО «АВТОВАЗ» прошли определенные процессы пусконаладки и в ходе эксплуатации данных ультразвуковых сварочных комплексов были выявлены проблемы:

- отсутствие запасных соноотродов (волноводов для периодической замены, вышедших из строя;
- частый выход из строя соноотродов, что определяло снижение производительности и снижение качества, т.к. возникала необходимость выполнения ручной сварки точек – является высоким риском проявления дефектов, влияющих на внешний вид, такие как: пятна и опечатки, неприлегания на стыках вызванные неравномерными зазорами между свариваемыми деталями;
- максимальная производительность ограничена темпом 31 шт/час.

Исходя из этого мы понимаем следующие, что данные аспекты напрямую влияют на качество сварных элементов обивок дверей и для наработки плана действий, нужно подробно познакомиться с спецификой данного исследования, чтобы найти выходы и решить основные проблемы ультразвукового оборудования.

## **1.1 Анализ назначения дверных обивок**

История обивки дверей автомобилей отражает эволюцию автоиндустрии, от простых деревянных или металлических обшивок до современных, сложных и комфортных панелей. На ранних этапах обивка была функциональной, направленной на защиту от непогоды и улучшение звукоизоляции, например, как обивка первого серийного автомобиля Волжского Авто Завода, а именно модели 2101, с которой началась история выпуска всего семейства автомобилей автозавода с 19 апреля 1970 года

рисунок 4.



Рисунок 4 – Салона автомобиля 2101 1970 года выпуска

Позже, с развитием технологий и повышением комфорта, обивка стала важным элементом дизайна интерьера, претерпела многие изменения, включая изменение приоритетов на разнообразие материалов и повышение уровня комфорта в салоне автомобиля. Обивка дверей современных автомобилей выполняет сразу несколько функций, среди которых важнейшими являются:

- Закрытие внутреннего пространства дверей, предотвращающего доступ влаги и пыли внутрь кузова.
- Шумоизоляция и теплоизоляция салона.
- Элементы безопасности, такие как распределение ударных нагрузок при авариях.

Конструкция обивки нашего отечественного автомобиля LADA VESTA NG включает панель, выполненную из устойчивых к климатическим условиям материалов, покрытую слоем полиуретана и декоративного покрытия. Внутренняя сторона оснащена элементами крепления и механизмами, такими как ручки открытия дверей, кнопки блокировки и регулировки окон. эскиз представлен на рисунке 5.

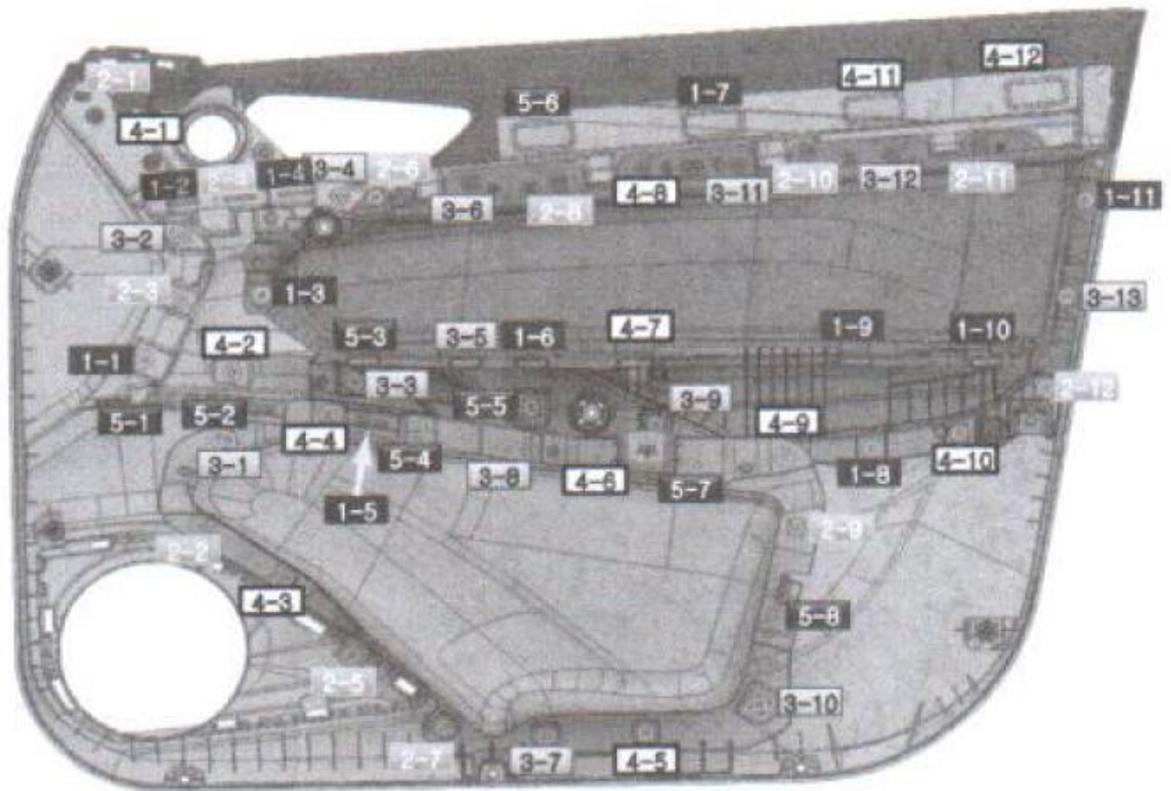


Рисунок 5 – Эскиз сборной панели передней двери автомобиля LADA VESTA NG

Одной из инновационных особенностей новой конструкции дверей является интеграция подлокотника и защитных элементов прямо в структуру обивки. Такой подход способствует значительному укреплению всей конструкции двери, превращая внутреннюю обшивку в конструктивно важный элемент, принимающий участие в поглощении ударов и снижении риска получения травмы всех пассажиров, находящихся в салоне автомобиля LADA VESTA NG.

Используемые материалы включают прочные пластмассы, обработанные специальными составами, обеспечивающими стойкость к механическим повреждениям и неблагоприятному воздействию внешней среды. Специальные элементы декора и фурнитура выполнены из износостойких материалов, соответствующих требованиям автомобильной индустрии.

Переход на новую технологию производства, совершенствование конструкций и использование новых материалов позволили достичь значительных результатов:

- Увеличение прочности и срока службы деталей.
- Экономия ресурсов и улучшение экологии производства.
- Создание комфортной и безопасной обстановки в салоне автомобиля.

Внутренние панели дверей автомобиля LADA VESTA NG играют значительную роль в обеспечении комфорта, безопасности и эстетичности транспортного средства. Рассмотрим подробнее назначение и характеристики этих панелей.

1. **Безопасность:** Панели выполняют защитную функцию, укрепляя кузов автомобиля и защищая пассажиров от возможных боковых ударов. Благодаря использованию специальных конструкционных материалов, они способствуют рассеиванию энергии удара, повышая уровень пассивной безопасности автомобиля.

2. **Шумоизоляция:** Современные автомобильные панели оснащены материалами, предназначенными для подавления посторонних звуков и вибраций. Использование звукопоглощающих покрытий создаёт комфортные акустические условия внутри салона, что повышает общее впечатление от вождения.

3. **Механизмы и оборудование:** внутри панелей размещается различное оборудование, включая замки, стеклоподъёмники, динамики аудиосистемы и другие компоненты. Их надежное крепление обеспечивается особенностями конструкции панелей.

4. **Эргономика и дизайн:** помимо функциональных качеств, панели дверей служат элементом оформления интерьера автомобиля. Они оснащаются ручками, карманами и отделочными деталями, которые повышают удобство использования авто и формируют внешний облик салона.

Основные панели и обивки дверей изготавливаются из полипропилена (PP) рисунок 6, обладающего множеством ценных свойств для использования

в промышленности и потребительский свойствах:

- Высокая механическая прочность и жёсткость.
- Низкая плотность и вес, что снижает общую массу автомобиля и уменьшает потребление топлива.
- Высокая прочность, которая не поддается как химией, так и физическим воздействиям при эксплуатации.
- Высокая устойчивость проявления посторонних запахов и дыма в салоне автомобиля.
- Хорошая электрическая сопротивляемость.
- Низкая проводимость тепла и низкий коэффициент теплового расширения.



Рисунок 6 – Обивка двери LADA VESTA NG и сырье полипропилен (PP).

Эти свойства делают полипропилен идеальным материалом для автомобильных панелей, позволяя создавать лёгкие, надёжные и долговечные элементы интерьера.

Будущие разработки направлены на дальнейшее улучшение характеристик панелей дверей, включая разработку композитных материалов, облегчённых конструкций и новые технологии нанесения декоративных

покрытий. Особое внимание уделяется вопросам энергосбережения и экологической безопасности, что требует постоянного обновления технологий и подходов к производству автомобильных компонентов.

Именно так, панели дверей современного автомобиля представляют собой сложный инженерный продукт, сочетающий функциональность, эстетику и высокие технические требования, гарантируя оптимальные условия для водителя и пассажиров автомобилей LADA VESTA NG и после понимания назначения детали, требуется подробно изучить его материал, в нашем случае пластик.

## **1.2 Общие сведения о пластмассах**

«Пластмассы – это синтетические полимеры с высокой молекулярной массой, которые нашли широкое применение в различных сферах современной жизни. Они вытеснили многие традиционные материалы, такие как металл, дерево и стекло. Производство изделий из пластмасс требует меньше трудозатрат, при этом сами изделия обладают малым весом, привлекательным внешним видом и не нуждаются в сложном уходе. Кроме того, пластмассы отличаются высокими изоляционными свойствами, устойчивостью к химическим веществам и механическим воздействиям. Получают эти материалы путём полимеризации – химической реакции, в которой молекулы мономеров соединяются в длинные полимерные цепи при строго фиксируемых настройках и условиях» [1], [2].

А теперь рассмотрим условие, допустим необходимо обозначить структурную единицу полимера (мономерное звено) как  $[-M-]$ , то формулу полимера можно представить в виде  $[-M-]_n$ , где  $n$  – степень полимеризации, то есть количество повторяющихся мономерных звеньев в цепи [3]. Высокомолекулярными полимерами называют соединения с большой степенью полимеризации. В случае гомополимеров, состоящих из одинаковых мономерных звеньев, степень полимеризации ( $n$ ) рассчитывается как

отношение молекулярной массы макромолекулы к молекулярной массе мономерного звена.

Значение степени полимеризации заключается в ее определяющем влиянии на ключевые свойства высокомолекулярных соединений, в первую очередь на их физико-механические показатели. Рост длины полимерной цепи вызывает:

- повышение температуры плавления материала;
- улучшение прочностных характеристик;
- увеличение химической устойчивости;

При этом на практике обычно оперируют среднечисловой степенью полимеризации, поскольку практически все полимерные материалы представляют собой смесь макромолекул с различной длиной цепи. Это объясняется статистическим характером процесса полимеризации, приводящим к образованию молекул с неодинаковым числом мономерных звеньев [4].

Ключевые характеристики полимеров определяются прежде всего их химическим строением [7]. Однако для придания материалам специальных свойств в их состав могут вводиться различные модифицирующие компоненты:

1. Компоненты для улучшения механических свойств: полимерные смеси, эластомеры (например, синтетические каучуки), армирующие наполнители (стекловолокно, углеродные волокна)

2. Функциональные добавки: пластификаторы (для повышения эластичности), стабилизаторы (термические и УФ-стабилизаторы), антипирены (для снижения горючести), а также электромодифицирующие добавки

3. Технологические и декоративные такие как: Красители и пигменты, преобразователи, антистатика, минеральные наполнители (тальк, мел,

древесная мука) [49].

На практике разрабатываются специализированные марки пластмасс с оптимизированным набором характеристик. Например, для наружного применения создаются материалы, сочетающие высокую механическую прочность, устойчивость к температурным перепадам, водостойкость, УФ-стабильность [7].

Такая комплексная модификация позволяет создавать полимерные материалы с точно заданными эксплуатационными параметрами для конкретных условий применения. В зависимости от поведения пластиковое сырье при нагреве подразделяется на термопласты, которые в свою очередь могут много раз быть подвержены нагреву и охлаждению, не меняя при этом своих свойств, и реактопласты, которые при нагревании не расплавляются.

По своему строению полимерное сырье группируется на такие полимеры, как карбоцепные полимеры, макромолекулы которых состоят исключительно из атомов углерода, гетероцепные полимеры, которые содержат в основной цепи атомы других элементов (такие как O, N, различные серы и прочее). Так же есть понимание как особенность макромолекулярной динамики, проявляется под воздействием термических факторов или электрического поля макромолекулы полимеров проявляют сегментальную подвижность. Такой показатель как степень гибкости полимерной цепи является критическим фактором, определяющим такие свойства как термопластичность, механические свойства, реологические характеристики и диэлектрические показатели и мы понимаем, чем выше гибкость, тем ниже температуры стеклования полимера, жесткость цепи повышает термостабильность, но снижает эластичность [7].

Если анализировать классификации полимеров по такому параметру как полярности эл. поля, то они под собой разделяются на неполярные, такие как полиэтилен (PE), полипропилен (PP) и далее на полярные полимеры, например, поливинилхлорид (PVC) [3], важно заметить, что полярные и неполярные обладают принципиально разной химической природой, что

приводит, к отсутствию взаимной растворимости и невозможности образования прочных межмолекулярных связей, и еще технологическим ограничениям при сварке и смешивании [3].

Рассматриваемый продукт по своей структуре подразделяется на группы так называемых кристаллических и группа аморфных структур, при рассмотрении кристаллических полимеров мы видим, что они характеризуются частичной упорядоченностью молекулярной структуры, а такие полимеры как аморфные, уже обладают полностью противоположными строениями, они неупорядоченные по своему типу, а если смотреть на особенности кристаллических полимеров, их отличие от металлов, это обладание неполной кристалличностью, которая количественно выражается через степень кристалличности, так же при переходе из вязко-текучего состояния в твердое образуют упорядоченные молекулярные ассоциации, кристаллы, которые можете видеть на рисунке 7, прошу заметить, что есть закономерности, такие как скорость охлаждения напрямую влияет на размер сферолитов: медленные охл, это крупные сферолиты, быстрое, это мелкие сферолиты и даже в кристаллических полимерах присутствуют аморфные области. Управляя скоростью охлаждения расплава термопласта, можно целенаправленно изменять структуру материала, контролировать свойства получаемого изделия и оптимизировать характеристики сварных соединений [5].

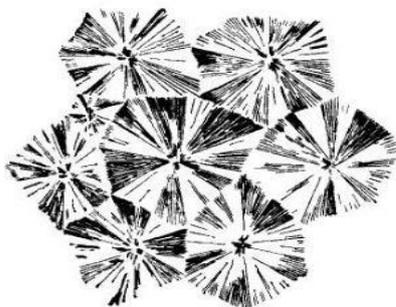


Рисунок 7 – Увеличенная структура, на которой изображены крупные сферолиты полимера при кристаллизации (полипропилен) [5]

Так же подчеркнем, что полимеры, как высокомолекулярные соединения, не способны переходить в газообразное состояние из-за их термической нестабильности: температура разложения у них ниже температуры кипения. Поэтому они существуют только в твердой и жидкой фазах [3].

Фазовые переходы полимеров при нагреве, сначала идет твердое состояние (область 1, рисунок 8) это зона где температура ниже температуры стеклования, которая растет с увеличением молекулярной массы., дальше высокоэластичное состояния, при котором температуре выше стеклования, цепи макромолекул приобретают подвижность, материал становится эластичным, вязко текучее состояние которое характеризует, что при дальнейшем нагреве полимер размягчается, что важно для переработки (литья, экструзии, сварки), данные переходы отображены на термомеханической кривой (Рисунок 8), связывающей деформацию материала с температурой. Для сварки полимеров необходимо нагревание до вязко текучего состояния [6].

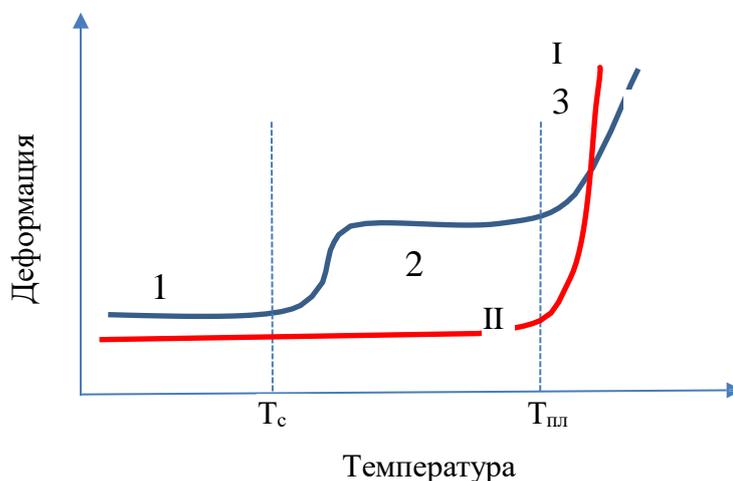


Рисунок 8 – Термомеханическая кривая кристаллический и аморфный полимер

Если смотреть на исходное состояние пластмассы, то вид представляет собой твердые гранулы около трех и четырех миллиметров сферической или цилиндрической формы, бесцветные или окрашенные. Наиболее распространены термопласты, которые при нагреве размягчаются, а при

охлаждении вновь затвердевают [8]. Это свойство позволяет использовать различные методы переработки, назовем следующие методы, такие как экструзия, выдувное формование, литье под давлением, термоформование, сварка, все эти методы основаны на способности термопластов переходить в вязко текучее состояние при нагреве [5].

Популярность полимерных материалов обусловлена их уникальным сочетанием высокой прочности и способности к обратимой деформации [7]. В отличие от хорошо изученных материалов, прочность пластмасс характеризуется сложной зависимостью от множества факторов, особо важные ключевые параметры, это структура и химическое строение полимера, состав композиции и тип наполнения, временные факторы, такие как срок хранения и старения, внутренние дефекты материала, следующий параметр это особенности испытаний, многообразие методик тестирования, критическая важность условий подготовки образца, влияние внешних факторов, температура и влажность и стандартный подход включает разрушение серии образцов (краш-тесты), использование универсальных испытательных машин, построение кривых «нагрузка-деформация» (моделирование) [12].

Пример зависимостей «нагрузка-деформация» представлен на рисунке 9.

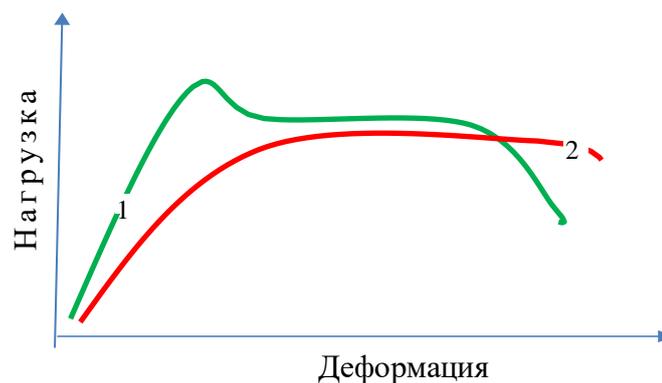


Рисунок 9 – Пример кривой «нагрузка- деформация»

Рассмотрим распространенные виды пластмасс и их применение, наиболее востребованные полимеры и материалы включают базовые

термопласты, такие как ПЭ, ПП, ПВХ – для производства труб, плёнок, пеноматериалов, далее идут специальные пластики, например ПА и фторопласты, ПММА, АБС пластики, поликарбонаты, полный перечень полимеров представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Примеры основных синтетических полимеров [6]

Полимер	Структура полимера	Структура мономера
Полиэтилен	$(-\text{CH}-\text{CH}_2-)_n$	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$
Полипропилен	$(-\text{CH}-\text{CH}_2-)_n$   $\text{CH}_3$	$\begin{array}{c} \text{CH}=\text{CH}_2 \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$
Полистирол	$(-\text{CH}-\text{CH}_2-)_n$   	$\begin{array}{c} \text{CH}-\text{CH}_2 \\   \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$
Поливинилхлорид	$(-\text{CH}-\text{CH}_2-)_n$   $\text{Cl}$	$\begin{array}{c} \text{CH}=\text{CH}_2 \\   \\ \text{Cl} \end{array}$
Тефлон	$(-\text{CF}_2-\text{CF}_2-)_n$	$\text{CF}_2=\text{CF}_2$
Полибутадиен	$(-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-)_n$	$\begin{array}{c} \text{CH}_2 \quad \text{CH}_2 \\ // \quad // \\ \text{CH}=\text{CH} \end{array}$

Раздел охватил основные свойства пластмасс, популярные виды полимерных материалов и способы их обработки. Следующим этапом требуется подробно рассмотреть процесс сборки данных деталей при помощи ультразвукового оборудования, который будем исследовать в следующем разделе.

### 1.3 Анализ автоматизированного цикла сварки

Автоматизированные комплексы для сварки пластмассовых изделий

нашли широкое распространение на промышленных предприятиях, поскольку они обеспечивают высокую скорость, стабильность и качество сваривания. Особенное внимание заслуживает технология ультразвуковой сварки, применяемая в автомобильном секторе для соединения пластиковых деталей, таких как панели дверей.

Особое внимание уделено применению много контактных (многоточечных) устройств ультразвуковой сварки. Такие машины способны одновременно обеспечить качественное соединение множества участков пластиковой панели, что ускоряет процесс производства и повышает его экономическую эффективность. Подобные комплексы эффективно применяются при изготовлении автомобильных панелей дверей, где важно достижение точной геометрии швов и сохранение структуры материалов.

В настоящее время на мировой арене действует немало предприятий, специализирующихся на проектировании и выпуске оборудования для ультразвуковой сварки пластмасс. Причем количество этих компаний постоянно увеличивается. Основными поставщиками компании АО «АВТОВАЗ» помогающие улучшить производственный процесс ультразвуковой сварки являются компании «Ultrasonic», «SIMENS», «СЕМАС», Корея. Так же в России есть технический центр «ВИНДЭК» Опыт, накопленный в области ультразвуковой сварки, и машиностроительная база компании Технический центр «Виндэк» позволили наладить производство автоматизированных станций УЗ сварки изделий из полимерных материалов для автомобильной промышленности. Станции УЗ сварки производства Технический центр «Виндэк» с передвижным столом обеспечивают максимальную безопасность, производительность и качество, включая в себя такие особенности как систему РОКА-УОКЕ, которая не даст оператору ошибиться или перепутать детали, что может повлечь за собой как брак, так и сбой и поломку самого оборудования, визуализация оборудования фирмы «ВИНДЭК» изображена на рисунке 10.



Рисунок 10 – Проект ультразвуковой сварочной машины для деталей Polo и Rapid, решетки бампера.

Опишем схему УЗСМ компании «ВИНДЭК», на схеме изображена сварочная машина (УЗСМ), включающая верхнюю поворотную платформу с набором волноводов для ультразвуковой сварки и нижнюю часть с так называемыми поддонами, которые точно воспроизводят контур детали, где размещается пластиковый элемент, который необходимо сварить, например это пластиковая панель и сопрягаемые элементы. Ультразвуковая сварка выполняется последовательно на данной машине, по схеме групповому свариванию точек, что обеспечивает высокую скорость изготовления заготовок и правильный метод приварки деталей.

На АО «АВТОВАЗ» в производстве пластмассовых изделий для соединения пластиковых дверных панелей применяется автоматическая установка многоточечной ультразвуковой сварки (рис. 11). Данное оборудование позволяет осуществлять сварку одновременно в нескольких точках, обеспечивать высокую производительность процесса, а также достигать стабильного качества соединений

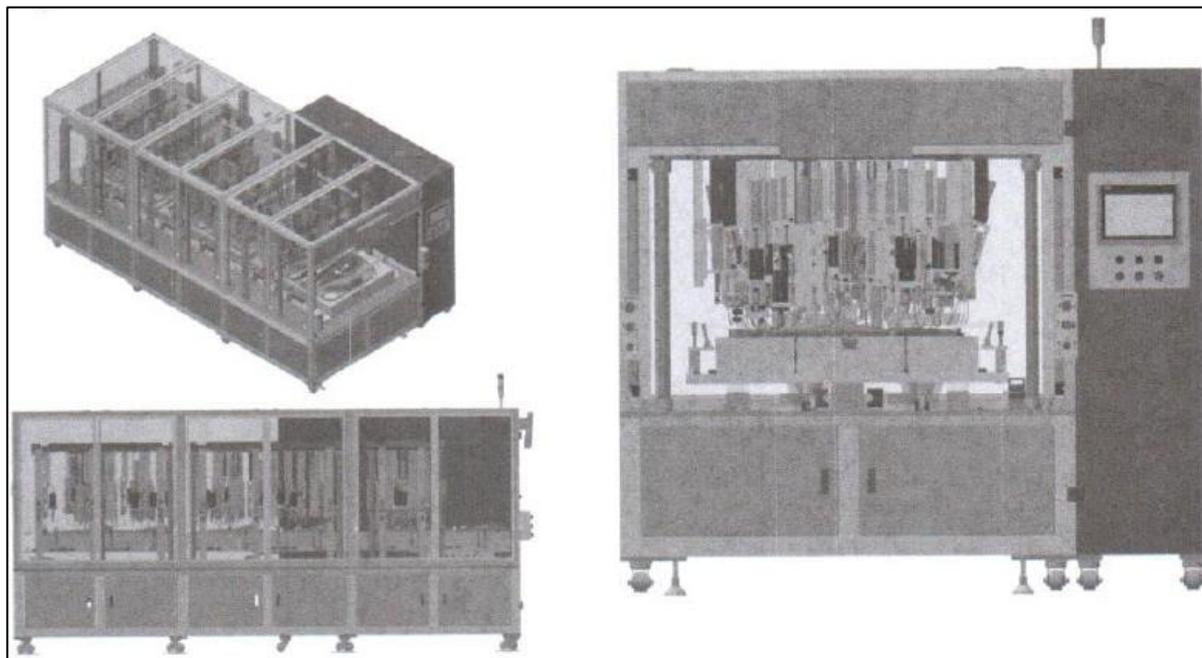


Рисунок 11 - Многоточечный автоматизированный комплекс для ультразвуковой сварки

Использование ультразвуковой сварочной машины имеет значительные преимущества:

- Высокая производительность и стабильное качество швов.
- Минимальная деформация деталей и отсутствие загрязнений поверхности.
- Возможность точного контроля глубины проникновения ультразвука и интенсивности нагрева.

Перемещение ультразвуковых головок осуществляется посредством пневмоцилиндров, что обеспечивает точное позиционирование и контроль над процессом приложения давления. Используются механические датчики для определения положения заготовки относительно сварочной головки.

Комплекс состоит из следующих основных элементов:

- Верхняя платформа, на которой установлены ультразвуковые колебательные системы.
- Система перемещения заготовок, реализованная с помощью шагового

двигателя и приспособления-спутника.

- Рабочий стол с направляющими рельсами для движения заготовки.
- Стекланные защитные двери, ограждающие рабочую зону.
- Генераторы ультразвука, расположенные под рабочей поверхностью стола.
- Шкаф управления с интерфейсом для настройки режимов сварки и мониторинга рабочего процесса.

Алгоритм работы УЗСМ комплекса, следующий:

1. Оператор устанавливает подготовленную заготовку на приспособление-спутник.
2. Спутник автоматически перемещается вдоль рабочих позиций.
3. Головки колебательных систем опускаются до момента контакта с поверхностью детали.
4. Под действием электрического импульса генерируются ультразвуковые колебания, создающие эффект местного разогрева материала.
5. Давление, создаваемое системой привода, способствует формированию прочного сварного шва.
6. После завершения процесса сварки головные блоки поднимаются вверх, освобождая готовую деталь.

Этот цикл повторяется многократно, обеспечивая высокую производительность при сохранении требуемого качества сварных соединений.

УЗСМ очень важны для предприятия, так как за частую, данный комплекс способен в больших объёмах производить необходимую продукцию, потому что именно объёмы производства помогают сохранить долю рынка, а так же любой значимый проект не обходится без модернизации текущего либо нового оборудования, что бы понять важность исследования в повышении качества ультразвуковой сварки, мы на примере проекта по переносу части производства ультразвуковых сварочных машин из ООО «ЛАДА Ижевск» на производственную площадку АО «АВТОВАЗ»

познакомимся с основными аспектами качества, так как, при запуске данного проекта оборудование прошло определенные процессы пуско-наладки и в ходе эксплуатации данных ультразвуковых сварочных машин были выявлены некоторые проблемы, связанные с качеством, так как качество напрямую влияет на имидж бренда, давайте подробно познакомимся с данными аспектами:

- отсутствие запасных соноотродов (волноводов для периодической замены, вышедших из строя;
- частый выход из строя соноотродов, что определяло снижение производительности и снижение качества, т.к. возникала необходимость выполнения ручной сварки точек – риск возникновения видовых дефектов: белёсые пятна, неравномерные зазоры на стыках свариваемых деталей;
- максимальная производительность ограничена темпом 31 шт/час.

Этим аспектами мы подчеркиваем важность данной исследовательской работы, направленной на повышение качества успешным запуском проекта LADA VESTA NG для того, чтобы понять причины отклонений, необходимо изучить принцип процесса ультразвуковой сварки более подробно.

#### **1.4 Рассмотрение принципа ультразвукового оборудования**

Основу ультразвуковой сварки составляет передача высокочастотных колебаний на соединяемые детали. Эти колебания возбуждают внутренние энергетические процессы в материале, в частности молекулярное трение, вызывающее локальный нагрев.

Упругие колебания — это волны, распространяющиеся в различных средах и сопровождающиеся деформациями. В зависимости от частоты они могут принимать разные формы, известные как 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 сред в момент времени  $t$ ;

$A_M$  – максимальное значение деформации;

$\omega$  – круговая частота колебаний;

$\varphi$  – начальный угол сдвига» [15].

Упругие гармонические волны, или по-другому «ультразвуковыми колебаниями» называют волны, частота которых выходит за пределы слышимого человеком диапазона — свыше 17–20 кГц. Если анализировать промышленный спектр экономики, то настоящим применяют колебания от 8 кГц и заканчивается пределом в 1 МГц, а для ультразвуковой сварки в большинстве случаев используют диапазон, который начинается от 18 и заканчивается в пределах 80 кГц.

«Не мало важный критерий, который влияет на качество сварки, является, критическая зависимость скорости распространения ультразвука, данный параметр является существенно важным для процессов ультразвуковой сварки и основой из себя представляет собой скорость распространения ультразвуковых волн в материале, определяемая соотношением:

$$,V = \sqrt{(E/\rho)} \quad (3)$$

где  $E$  – модуль упругости материала;

$\rho$  – плотность материала» [15].

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:

$$J = k(Af)^2 \rho c, \quad (4)$$

где  $A$  – амплитуда колебаний;  $f$  – частота колебаний;

$\rho$  – плотность среды;

$k$  – коэффициент пропорциональности;  $c$  – скорость звука в среде»

[15].

Процессы ультразвуковой сварки реализуются при помощи специализированных ультразвуковых сварочных комплексов, которые в свою очередь состоят из многих элементов таких как: Генератор колебаний, пьезоэлектрический или магнитострикционный преобразователь, акустический волновод (бустер), рабочий инструмент (сонотрод), пример такого комплекса изображен на рисунке 12.

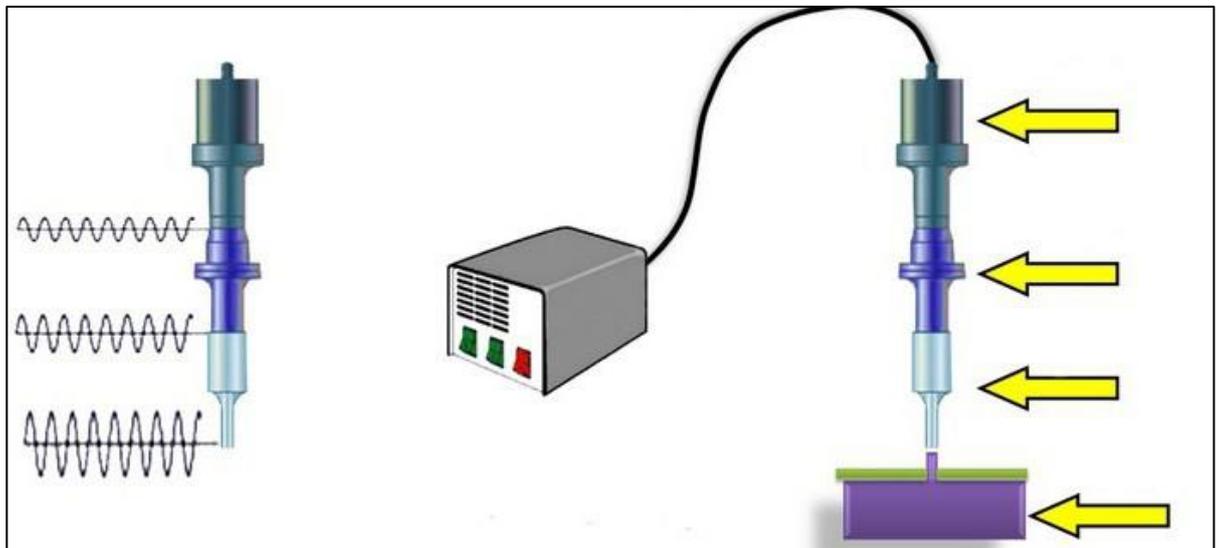


Рисунок 12 – Структурная схема комплексов для ультразвуковой сварки

Структуры современных установок для ультразвуковой сварки очень различно, но основа включает два основных функциональных модуля,

ультразвуковой генератор и колебательная система (акустический блок), рассмотрим данные модули по подробнее [2].

УЗ-генератор преобразует сетевой ток, который равен около 50 Гц, в высокочастотный сигнал ультразвукового диапазона и подает его в колебательную систему [2]. Ключевыми функциями являются поддержание резонансной частоты колебаний и регулировка мощности длительного или короткого сварочного импульса [2].

УК-система представляет собой акустический преобразовательный каскад, так же состоящий из трех основных компонентов, которые при эффективном взаимодействии, успешно выполняют свою функцию, познакомимся же с этими компонентами [2]:

Преобразование энергии начинается с высокочастотного электрического сигнала в пределах от 18 до 80 кГц. Далее от генератора подается на преобразователь, где происходит его трансформация в механические колебания, колебания осуществляются благодаря пьезоэлектрическому эффекту или по магнитострикционному, последний способ является участником устаревших конструкциях [2].

Амплитудное усилие, а именно первичные механические колебания преобразователя характеризуются небольшой амплитудой от 5 до 20 мкм, а также высокой частотной стабильностью и для практического применения требуется усиление, которое обеспечивает такой элемент как бустер, который в свою очередь твердо соединен с преобразователем через резьбовое или фланцевое крепление [19].

В свою очередь в связи очевидного отличия площади сечения, Усилителькратно повышает амплитуду колебаний. Так же отметим, что любой бустер имеет свои параметры повышения амплитуды [19].

Механические колебания затем поступают на соноотрод (волновод), находящийся в плотном соединении с бустером [19].

Собственно, основной функцией соноотрода является формирование сварки путем передачи УЗ-колебаний от усилителя на пластиковую деталь,

которая разогревается, становится пластичной и деформируется в результате небольшого усилия вовремя и на сегодняшний день, известно, что системы могут так же различаться типом, такими как магнитострикционные (рисунок 13) и пьезокерамические колебательные системы.

На рисунке 13 показана схема магнитострикционной колебательной системы:

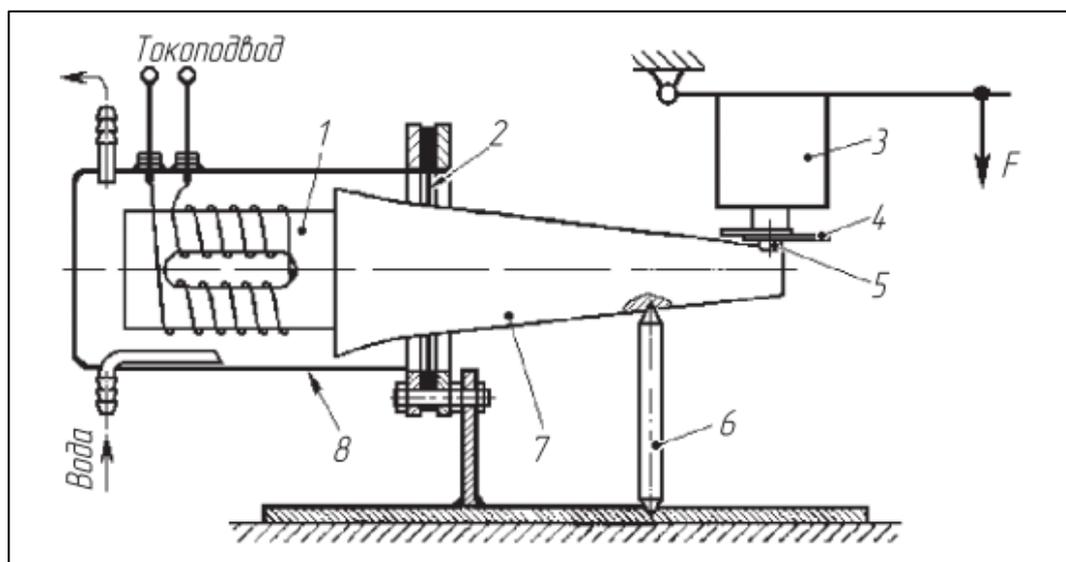


Рисунок 13 – Схема магнитострикционной колебательной для точечной сварки ультразвуком: 1 — магнитострикционный преобразователь; 2 — диафрагма; 3 — механизм нажатия; 4 — изделие; 5 — выступ; 6 — маятниковая опора; 7 — волновод; 8 — кожух водяного охлаждения

Конструкция магнитострикционного преобразователя заключается в материальной основе, где преобразователь выполнен в виде так называемых пакетов стальных пластинок из магнитострикционного сплава железо-кобальтовый состав (К49Ф2), обладающего свойством изменения геометрических размеров при воздействии переменного магнитного поля [6], а принцип действия заключается в результате подачи высокочастотного тока на обмотку преобразователя, создается переменного магнитное поле, пластины начинают колебаться с частотой, соответствующей приложенному магнитному полю и собственной резонансной частоте (определяемой геометрией стержня), так же можем заметить конструктивные особенности и

мы видим, что пластины соединены между собой механически при помощи эмалевого покрытия с переходником серебряным припоем, обмотка выполнена высокочастотным литцендратом из термостойкой изоляции которая оптимизирована для работы в диапазоне от 18 до 40 кГц [6].

Визуально мы можем наблюдать физическую модель ультразвуковой магнитострикционной колебательной системы, изображенной на рисунке 14.

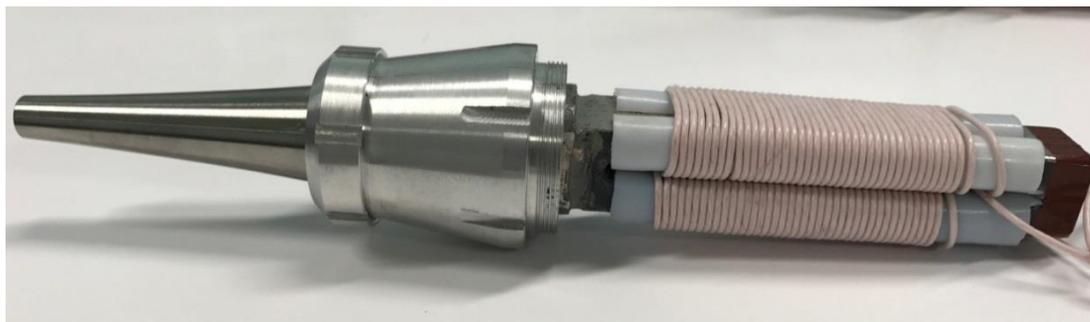


Рисунок 14 – Ультразвуковая колебательная система в сборе

При рассмотрении магнитострикционных систем, отмечаем, что рабочий диапазон в оптимальном режиме работы находится в пределах до 1 кВт, и при превышениях можем наблюдать нарастание гармонических искажений, снижение КПД преобразования, ускоренная деградация магнитострикционного материала, что приводит к нарушению стабильности резонансной частоты и снижение точности частотного захвата и увеличение тепловых потерь, но есть и преимущества, такие как длительный непрерывный рабочий цикл для процессов сварки, где требуются стабильные параметры в течении 8-12 часов.

Далее мы рассмотрим другой, более современный тип колебательной системы, пьезокерамической колебательной системы изображенную на рисунке 15:

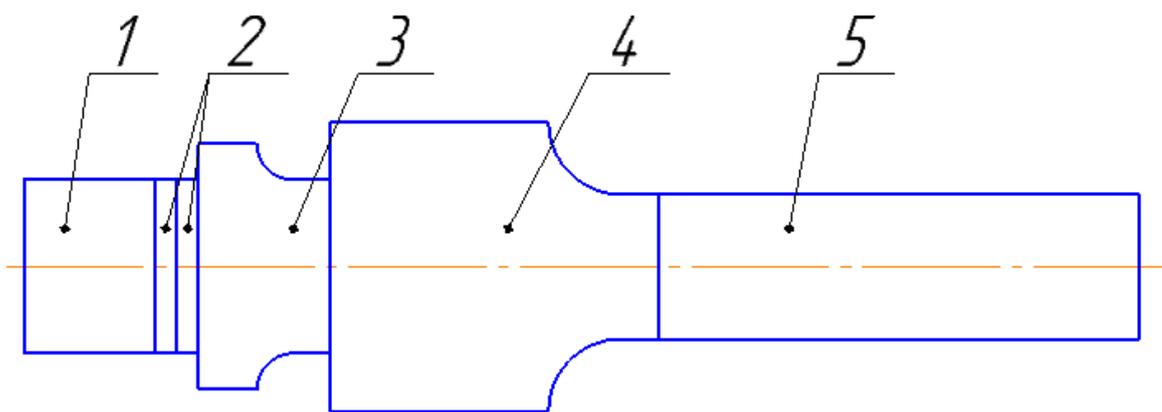


Рисунок 15 –Колебательная система пьезокерамического типа

Конструкция ультразвуковой колебательной системы пьезокерамического типа разделяется на основные компоненты, такие как отражательная накладка (1), которая выполняет две функции, первая это выполнение поглощения избыточного колебания, так называемого демпфирования, а вторая это перенаправление акустической энергии к соноотроду. Следующий компонент как пьезокерамические компоненты (проставки) (2), они изготавливаются методом порошковой металлургии и состоит из смеси оксидов и существует свыше 50 модификаций данных компонентов с разными параметрами, пьезокерамические элементы жестко закреплены на переходнике (3), прижим осуществляется через центральный шпindel и контактные поверхности полируются до Ra меньше чем 0,2 мкм, переходим от переходника (3) к следующим элементам системы соединёнными последовательно, такими как бустер (4) и волновод (5) [31].

Главное преимущество пьезокерамических систем в отличии от магнитострикционных, в том, что способность работать на высоких мощностях более одного киловатта, компенсирует их меньшую долговечность.

После понимания основ и видов колебательных систем, переходим к основному принципу ультразвуковой сварки, который основан на направлении механических колебаний высокой частоты в точку контакта с деталью, за счёт

этого молекулярное трение и трение граничной поверхности выделяют тепло, размягчая материал на молекулярном уровне [31]. Вместе с этим давление, оказываемое узлом привода подачи, усиливает сварное соединение шва [31].

Физическая основа процесса реализуется за счет направленного воздействия высокочастотных колебаний, что приводит к локальному тепловыделению в зоне контакта, в следствии чего мы видим молекулярное трение в материале, поверхностное трение в материале и далее пластификацию материала на молекулярном уровне после прекращения трения и давления на поверхность материала [31].

«При прекращении подвода ультразвуковых колебаний, происходит установление новых молекулярных связей между свариваемыми заготовками» [20]. В основном в процессах УЗ-сварки используют пределы частоты в пределах от 20 кГц до 100 кГц. Реже всего используются частоты ниже 20 кГц, такие диапазоны считаются инфразвуковыми и редко используются в промышленной практике, тогда как частота выше 100 кГц применяется крайне редко из-за сложностей с передачей достаточной мощности для эффективной сварки. Выбор конкретной частоты зависит от типа обрабатываемых материалов, толщины заготовок и необходимой точности сварки [35].

Стандартная конструкция системы ультразвуковой сварки включает три ключевых узла, первый — это генератор ультразвуковых колебаний, который преобразует сетевой ток 50 Гц в высокочастотный сигнал более 18 кГц, и при помощи которого обеспечивается точная регулировка параметров (мощность, частота, длительность импульса) второй узел — это преобразователь который трансформирует электрические колебания в механические вибрации на рабочей частоте 20-70 кГц с КПД преобразования около 85-95%, далее идет третий узел состоящий из бустера, который увеличивает колебания от 1,5 до 3 раз и волновода, который передает энергию в зону сварки, совершая продольные колебания [35].

Для ознакомления представлена визуализация ультразвукового

оборудования на рисунке 16.

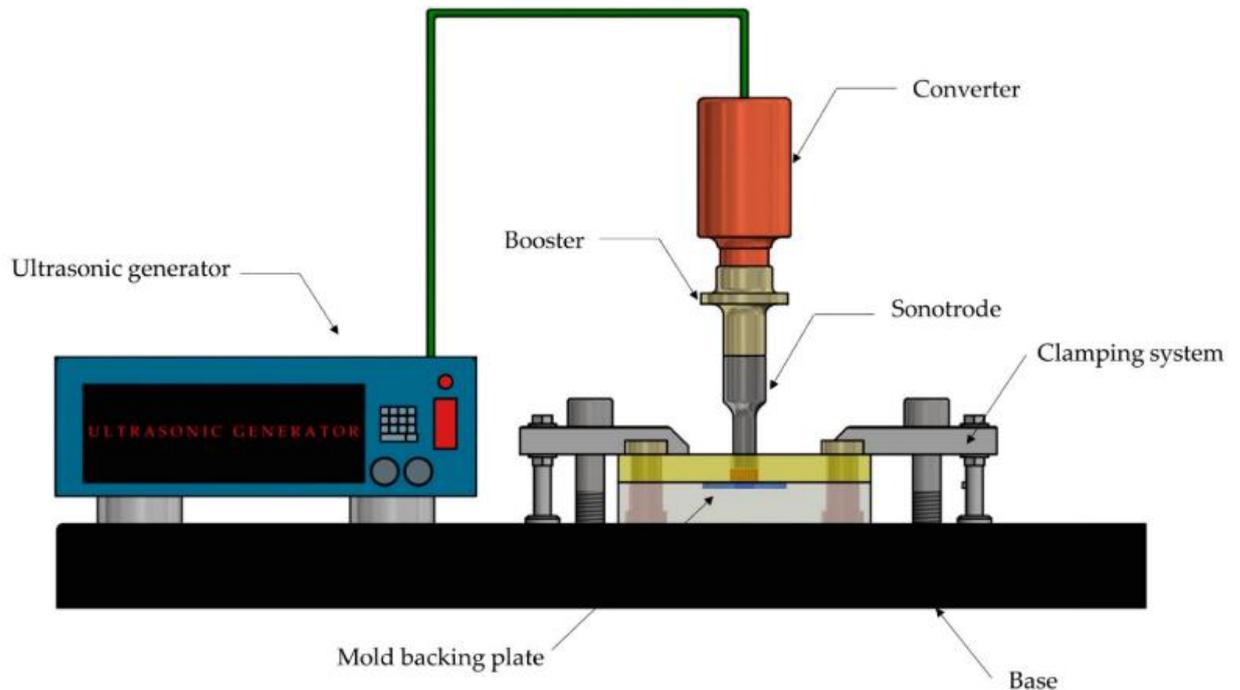


Рисунок 16 – Схема УЗ-сварочного оборудования

Конечной точкой соприкосновения с швом или точкой сварки является соноотрод, физическая основа процесса как было подчеркнуто ранее, реализуется за счет направленного воздействия высокочастотных колебаний, что приводит к локальному тепловыделению в зоне контакта, в следствии чего мы видим молекулярное трение в материале, поверхностное трение в материале и далее пластификацию материала на молекулярном уровне после прекращения трения и давления на поверхность материала [39].

Поэтому после вышеперечисленного анализа, необходимо плотно познакомиться с основной частью ультразвуковой установки, которая напрямую воздействует на место сварки, переходим к анализу значения соноотродов.

## 1.5 Анализ значения соноотродов в ультразвуковой сварке

Важнейшей частью установки для ультразвуковой сварки служит соноотрод (или волновод). Этот элемент обеспечивает передачу энергии ультразвукового сигнала непосредственно к месту соединения материалов,

обеспечивая точность и равномерность воздействия на материал, соноотрод как основной элемент, испытывающий высокие перегрузки, что приводит к сбоям в работе при его чрезмерном износе, изображен на рисунке 17.

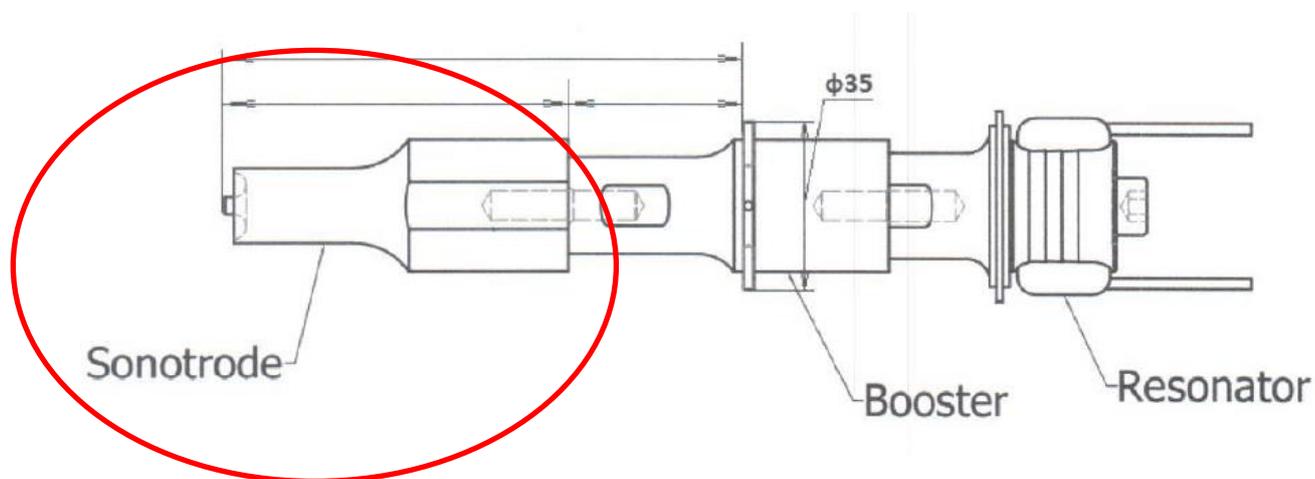


Рисунок 17 – Оборудование ультразвуковой сварки

Волновод может иметь различную конструкцию в зависимости от конкретной ситуации. Чаще всего он состоит из трех основных элементов:

- Переходник (резонатор): соединяет генератор с остальной частью системы.
- Бустер: усиливает мощность механических колебаний.
- Соноотрод: непосредственно передает вибрационные волны обрабатываемому материалу.

Однако, состав компонентов волновода варьируется в зависимости от конкретных условий эксплуатации. Например, иногда достаточно комбинации двух частей — бустера и соноотрода, а в некоторых случаях используются лишь отдельные элементы, такие как один только соноотрод.

Таким образом, конструкция волновода выбирается исходя из специфики решаемой технологической задачи.

Материалы изготовления оснастки для ультразвуковой сварки, включая соноотрод, является ключевым элементом, который обеспечивает эффективное и надежное соединение материалов. Выбор подходящего материала для

изготовления оснастки имеет критическое значение для долговечности и производительности оборудования. В работе мы рассмотрим различные материалы, используемые для изготовления оснастки, их плюсы и минусы, а также особенности применения в различных условиях. Для изготовления сонотродов используются различные материалы, каждый из которых имеет свои уникальные характеристики, преимущества и недостатки.

Научно-исследовательская работа по изучению волноводов в лабораториях Тольяттинском государственном проводятся комплексные исследования различных типов волноводов для ультразвуковых технологий. Результаты исследований находят практическое применение в различных отраслях промышленности, включая автомобилестроение.

На рисунке 18 представлены различные виды волноводов, а на рисунке 19, конкретно волновод из титанового сплава.

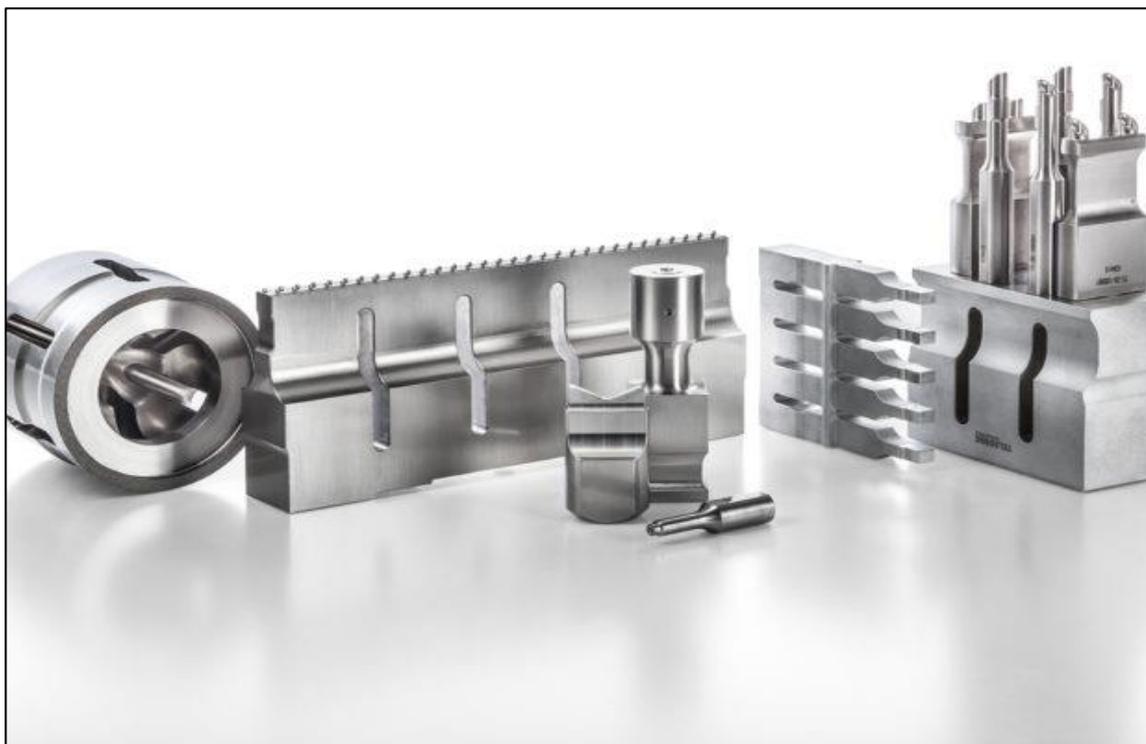


Рисунок 18 – Различные виды волноводов (сонотродов), используемых для УЗ сварки



Рисунок 19 –Сонотрод из титанового сплава ВТЗ-1

Сравнительный анализ значения сонотрода показывает на сколько важно выбрать не сколько конструкцию, сколько материал изготовления самого изделия, поэтому стоит погрузиться в изучение и сделать сравнительный анализ материалов для изготовления сонотродов для ультразвукового оборудования, машин и комплексов.

### **1.6 Анализ материалов сонотродов для ультразвукового оборудования**

Для изготовления сонотродов часто используются металлические материалы, такие как латунь, алюминий, и, в некоторых случаях, покрытые серебром или другими хорошо проводящими металлами, сталями или титаном. Также используются полимерные материалы, например, полимеры. Выбор материала зависит от типа волновода и его применения, в данном случае будем подбирать материал для ультразвуковой сварки пластиковых элементов обивки дверей LADA VESTA NG предприятия пластмассовых

изделий АО «АВТОВАЗ».

Для того, чтобы подобрать материал для волноводов, необходимо углублённо изучить и познакомиться с основными характеристиками основных материалов для исследовательской работы, поэтому мы рассмотрим в таблицах ниже основные параметры алюминиевых сплавов, титановых и марки сталей, для подбора нужного материала.

Таблица 2 - Алюминиевые сплавы

<b>Материал</b>	<b>Плотность, г/см<sup>3</sup></b>	<b>Модуль Юнга, ГПа</b>	<b>Предел прочности, МПа</b>	<b>Аналог</b>
Д16 и Д16Т	2,78	72-73	450-490	2024 (Al-Cu-Mg)
В95	2,85	72-73	540-600	7075 (Al-Zn-Mg-Cu)
АМг3	2,66	70	260-350	5754 (Al-Mg)
АМц	2,83	69	400-450	3003 (Al-Mn)
Ал9	2,7	68,9	310-350	6061 (Al-Mg-Si)

Таблица 3– Стали

Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Модуль Юнга, ГПа	Предел прочности, МПа	Аналог
12X18H10T	7,9	200	490-620	AISI 321 (S32100)
X12MФ	7,85	210	800-1000	D2 (AISI D2)
40X13	7,75	200	620-860	AISI 420 (S42000)
У8А	7,85	210	700-800	1080 (AISI 1080)

Таблица 4– Титановые сплавы

Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Модуль Юнга, ГПа	Предел прочности, МПа	Аналог
BT1-0	4,51	105	480-540	Grade 1 (Commercially Pure Titanium)
BT3-1	4,43	114	900-950	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo
BT6	4,43	114	900-950	Ti-6Al-4V (Grade 5)
BT20	4,64	113	900-1100	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo

Исходя из данных таблиц можно выделить следующие выводы:

Материал Д16Т — это дюралюминиевый сплав, который широко

используется благодаря своей хорошей прочности и коррозионной стойкости, а термоупрочнённая версия данного материала, делает его отличным выбором для условий с умеренными механическими нагрузками. но он имеет существенный минус, а именно: может деформироваться при экстремальных условиях эксплуатации, вид самого материала на рисунке 20.



Рисунок 20 – Материал сплава Д16Т

Благодаря этому, данный продукт не нуждается в дополнительной термической обработке, что исключает часто встречающуюся проблему усадки заготовок после естественного или искусственного закаливании, данное явление типично для деталей, изготовленных из сплава Д16.

Химический состав дюралюминия марки Д16Т строго регулируется ГОСТом 4784-97, обозначение маркировки дюралюминия расшифровывается довольно легко: Д – дюралюминий, 16 – порядковый номер сплава в линейке, Т – означает, что материал прошел закалку и естественное старение.

Дюралюминий марки Д16Т представляет собой алюминиевый сплав

системы Al-Cu-Mg с добавлением марганца. Основу материала составляет алюминий, содержание которого достигает 94,7%, а оставшаяся часть включает медь, магний и дополнительные легирующие элементы.

Марганец в составе сплава выполняет важную функцию: он повышает устойчивость к коррозии и усиливает механические характеристики. При этом он не формирует совместно с алюминием упрочняющие фазы, а образует дисперсные включения химического состава  $Al_{12}Mn_2Cu$ .

Железо оказывает отрицательное влияние на эксплуатационные свойства сплава Д16Т, поскольку не растворяется в алюминиевой матрице. В структуре дюралюминия феррум формирует крупные пластинчатые образования, что приводит к значительному ухудшению как прочности, так и пластичности материала.

Дополнительным негативным фактором является способность железосодержащих примесей связывать медь в соединения. Это уменьшает эффект упрочнения, который обычно достигает оптимума после процесса естественного старения. Учитывая эти факторы, ГОСТом установлены строгие ограничения на содержание железа - допустимая массовая доля не превышает 0,5-0,7%.

Международный аналог сплава Д16Т, а именно в западной классификации существует эквивалентный аналог дюралюминия Д16Т - сплав 2024 Т3511. Данный материал обладает идентичной плотностью, составляющей 2,78 г/см<sup>3</sup>, но отличается принятой за рубежом системой обозначений.

Технология термообработки сплава Д16Т, для улучшения эксплуатационных характеристик сплав Д16Т проходит многоступенчатую термообработку, включающую в себя этапы обработки:

– Первая закалка происходит в диапазоне температур от 490 до 505 градусов Цельсия, превышение указанных температур вызывает перегрев структуры с последующем пережогом алюминия, что приводит к значительной деградации механических свойств материала;

– Искусственное охлаждение, этот способ охлаждения является закалка в водной среде, критическим параметром является температура охлаждающей жидкости, для этого нужен оптимальный температурный диапазон воды, это необходимо для остужения материала до диапазона от 250 до 350 градусов Цельсия, при этом достигается максимальное устойчивое состояние к таким процессам как межкристаллитной коррозии и питтинговой коррозии.

Далее мы переходим к анализу альтернативного материала, а именно к нержавеющей сталям, которые представляют собой сложные металлические сплавы на железо-углеродной основе с обязательным введением легирующих компонентов. Фундаментом данных материалов служит система Fe-C, куда дополнительно вводятся специальные модифицирующие добавки, обеспечивающие уникальные эксплуатационные свойства.

Ключевым легирующим элементом материала нержавеющей сталей выступает хром, минимальное содержание которого должно составлять 10,5%. Именно эта концентрация обеспечивает нержавеющей сталям коррозионную стойкость. Существенную роль играет также никель, который существенно влияет на физико-механические характеристики конечного продукта, визуальный вид нержавеющей сталей можно наблюдать на рисунке 21.



Рисунок 21 – Материал нержавеющей сталей

При маркировке создается обозначение, которое содержит цифры и буквы. Первое двузначное число указывает на наличие углерода и его количество. После этого значения идут буквы, которые показывают наличие легирующих добавок. После указания этих элементов в виде цифры указывается их количество с округлением до целого числа. В случае, когда это число составляет 1-1,5 процента цифра будет отсутствовать.

Как расшифровать маркировку, в каждой букве, которая содержится в маркировке стали имеет свое определенное значение:

- Х – содержание хрома;
- Н – содержание никеля;
- Т – содержание титана;
- В – содержание вольфрама;
- Г – содержание марганца;
- Д – содержание меди;
- М – присутствие молибдена.

Нержавеющая сталь обладает высокими антикоррозийными свойствами, которые позволяют ее применять при изготовлении различного рода деталей, которые предназначены для эксплуатации в неблагоприятных условиях. Она используется практически во всех сферах производства: в химической, пищевой, авиационной промышленности, электроэнергетике, транспортном машиностроении. Некоторые марки способны сохранять свои свойства даже под воздействием высоких температур, которые достигают до 800 градусов.

Нержавеющая стали с высокой износостойкостью и прочностью, которая используется в условиях, где важна долговечность и устойчивость к износу, но их существенные минусы, а именно: ограниченная коррозионная стойкость в агрессивных средах, трудности в обработке, данный материал с такими минусами будет только мешать техпроцессу, а также будет занимать львиную долю времени на воспроизводство запасных частей, что делает их непригодными для наших испытаний.

Следующий материал, который мы постараемся изучить, является лидером среди многих, называется он титан, и так, титановый сплав марки ВТЗ-1 демонстрирует комплекс превосходных эксплуатационных характеристик, включая высокую коррозионную стойкость, повышенную жароустойчивость и оптимальные механические свойства. Основными легирующими компонентами сплава титана выступают такие компоненты как алюминий и молибден, так же есть дополнительные примеси, которые в некоторых вариантах, тоже выполняют роль легирующих элементов, такие как хром, цирконий, железо, кремний, газообразные элементы. Сплав титана имеет двухфазную структуру ( $\alpha + \beta$ ), что определяет его технологические особенности и свойства, например, свариваемость является ограниченной, так же должны знать и возможности термообработки такие как отжиг, закалка, старение. По области применения материал используется для производства штампованных изделий и кованных деталей, эксплуатационный температурный диапазон начинается от средних до высоких. Широко применяется в различных направлениях в машиностроительной отрасли, что будет являться для нас приоритетом при выборе материала в дальнейшем, посмотрим визуализацию материала, изображённую на рисунке 22.



Рисунок 22 – Материал титан

«Химический состав марки ВТЗ-1 в % согласно ГОСТ 19807-91:

- Ti (титан) 89,95-91,05;
- Fe (железо) 0,2-0,7;
- C (углерод) до 0,1;
- Si (кремний) 0,15-0,4;
- Cr (хром) 0,8-2;
- Mo (молибден) 2-3;
- N (азот) до 0,05;
- Al (алюминий) 5,5-7;
- Zr (цирконий) до 0,5;
- O (кислород) до 0,15;
- H (водород) до 0,015.

Механические свойства сплава ВТЗ-1 при температуре 20°C:

- предел кратковременной прочности 930-1230 МПа;
- относительное удлинение при разрыве 6-20%;
- относительное сужение 15-60%.

Твердость материала:

- после отжига, штамповка - НВ 10-1 = 269-363 МПа;
- после закалки и старения, штамповка - НВ 10-1 = 302-415 МПа.

Физические свойства сплава ВТЗ-1 при температуре 20°C:

- модуль упругости первого рода  $1,15 \cdot 10^5$  МПа;
- коэффициент теплопроводности (теплоемкость материала) 8,01

Вт/(м·град);

- плотность 4500 кг/м<sup>3</sup>;
- удельное электросопротивление 1360 Ом·м» [4].

Титановые сплавы марки ВТЗ-1 с добавлением алюминия и ванадия, которые обладают отличной прочностью и коррозионной стойкостью. Эти сплавы широко используются в аэрокосмической и медицинской промышленности, что в рамках наших исследований очень хорошо вписывается в концепцию испытаний.

## 1.7 Анализ разрушения твердых тел при циклических нагрузках

Процесс разрушения механических материалов под действием циклических нагрузок принципиально отличается от деформаций при статическом нагружении. Данное явление, известное как усталостное разрушение, при рассмотрении механизма повреждения, можем отметить, что выглядит оно следующим образом, развитие микротрещин в зонах концентрации напряжений, далее постепенное накопление повреждений при каждом цикле нагружения, далее самое опасное, что мы не видим и не можем отследить фактор отсутствия видимых пластических деформаций перед разрушением.

Критическое отличие от статического нагружения является тем, что разрушение происходит при нагружениях ниже предела текучести материала, так же требует значительное число циклов нагружения и характерное отличие это излом, который имеет зоны инициации и распространение трещины.

Нужно понимать и факторы влияния на усталостные повреждения такие как амплитуда приложенных напряжений, частоту нагружения, наличие концентраторов напряжения, поверхностное состояние материала, коррозионная среда.

Усталостное разрушение представляет особую опасность для ответственных конструкций, так как разрушение происходит внезапно без заметных и предварительных признаков и для повышения усталостной прочности применяют различные методы поверхностного упрочнения и снижения концентрации напряжений [11].

«Усталостное разрушение возникает во время действия напряжений, которые меньше предела прочности при условии неизменной нагрузки на объект. Неоднократные повторяющиеся нагрузки вызывают постепенное увеличение локальных повреждений в металле, переходящих в трещинки, которые в свою очередь, увеличиваясь, образуют макроскопическую трещину. Далее подъем усталостной трещины регулируется коэффициентами

интенсивности напряжения у её верхушки. По мере возрастания усиленного напряжения, меняется положение материала у верхушки трещины» [14].

Усталостные трещины преимущественно формируются в зонах максимальных напряжений, возникающих на поверхности или в приповерхностном слое деталей и образцов. [30] Данный процесс характеризуется следующими закономерностями, как первичные очаги, возникающие на свободных поверхностях, зоны зарождения коррелируют с областями пиковых напряжений, так же возможно образование даже на идеально гладких полированных поверхностях [30]. Конечно, влияние концентраторов напряжения резко ускоряют процесс инициации трещин в материале, снижают циклическую долговечность материала и увеличивают вероятность многократного трещинообразования в материале. По механизмам развития, подразделяются на стадии, на такие как стадия инициализации (занимает до 90% ресурса), стадия устойчивого роста трещины и стадия мгновенного разрушения, называемая как «долом». Особую опасность представляют скрытые поверхностные дефекты, которые при циклическом нагружении могут трансформироваться в очаги трещинообразования и для повышения сопротивления усталости рекомендуется устранить острые концентрации напряжения, применение методов поверхностного упрочнения, контроль качества обработки поверхности, использование материалов с высокой циклической прочностью.

Полосы локального скольжения образуются при условии воздействия повторяющихся нагрузок [15]. Полосы локального скольжения предполагают области с рельефными участками [15]. Месторасположение рельефных участков, обосновано связью с неоднородностью структуры, подобный примесям и легирующим составляющим, а еще методами получения данных материалов [15].

На начальном этапе макроскопического роста усталостная трещина демонстрирует следующие характерные особенности, такие как стадия

межкристаллитного распространения, трещина преодолевает границы нескольких зерен, основное направление роста — это перпендикулярно вектору приложенной нагрузки и скорость распространения значительно увеличивается. Множественное трещинообразование (происходит в основном при высоких нагрузках) включает такие факторы, как одновременное возникновение нескольких микротрещин, параллельное развитие с последующим слиянием, образование характерных морфологических особенностей, такие как ступенчатые сдвиговые деформации и продольные гребни в направлении роста трещины. При рассмотрении зональных особенностей, есть такие аспекты как области инициации сохраняют начальный след стадии зарождения трещины, центральная зона демонстрирует признаки ускоренного роста и периферийные участки отражают финальную стадию разрушения, данный процесс сопровождается локализацией пластической деформации, формированием характерного рельефа излома и появлением «усталостных бороздок» на поверхности разрушения.

Феноменология развития усталостных повреждений рассмотрим в процессе циклического нагружения наблюдается поступательное развитие трещины дефектов, характеризующееся следующими особенностями, как динамика трещинообразования, которое представляет инкрементное продвижение фронта разрушения при каждом акте нагружения, формирование специфического микрорельефа на поверхностях разрушения и генезис периодических усталостных стрий (мелких растяжек). Так же присутствуют морфологические особенности, например каждая стрия маркирует положение локального образования трещины после нагрузочного цикла, образуют систему квазипараллельных микро рельефных элементов, а геометрия определяется структурным-фазовым состоянием материала, кинематикой приложенных напряжений, режимам деформирования. Детерминирующие параметры в той же степени влияющие, это агрессивность эксплуатационной среды, которая усиливает рельефность стрии и индуцирует

образование поверхностных наслоений. Отметим такие теоретические аспекты как доминирующую концепцию Лейрда-Смита, которая моделирует механику трещинного роста, интерпретирует генезис стрий, учитывает зону пластификаций в вершине дефекта, а современные модификации учитывают кристаллографические эффекты и описывают анизотропные свойства. Исследование усталостного микрорельефа очень важное значение для диагностики и представляет собой возможность реконструировать историю нагружений, диагностировать условия эксплуатации, идентифицировать причины разрушения, оптимизировать ресурсные характеристики.

«Исходя из этой модели, возникновение усталостных бороздок обусловлено последовательным сжатием и расширением у боковых поверхностей трещины. Трещина движется под влиянием растягивающих напряжений, отчего происходит расширение устья трещины. Трещина подвергается сплющиванию при сжимающих напряжениях, что в свою очередь служит зарождением усталостной бороздки. Присутствие на поверхности излома усталостных бороздок, однозначно свидетельствует о том, что имеет место усталостному разрушению» [2].

Особенностями разрушения хрупких материалов происходит при ультразвуковом воздействии наблюдается следующий механизм разрушения, а именно процесс «накачка» вакансий, это миграция вакансий с поверхностей и границ зёрен, а также концентрация в локальных областях кристалла. Образование дефектов происходит после формирования вакансионных скоплений, после трансформации в призматические дислокационные петли и последующего схлопывания дефектов. В результате мы имеем развитие микроповреждений, инициирование трещин и прогрессирующее разрушение материала [23].

Особенность пластической деформации при усталостном разрушении наблюдаются характерные зоны пластической деформации, формирующиеся в процессе усталостного разрушения. Согласно модели Райса при

циклическом нагружении выделяются две основные области, это типы пластических зона, где монотонная зона (образуется на начальных стадиях нагружения) и циклическая зона (развивается при повторяющихся нагрузках), так же это механизмы формирования, где при наличии значительных сжимающих напряжений в вершине трещины, и при одновременном действии растягивающих напряжений перед фронтом трещины формируется повторяющаяся пластичная зона, так же характеристики зон, где монотонная зона связана с максимальными растягивающими напряжениями и циклическая зона обусловлена переменным напряжением [23].

Данные процессы объясняют повышенную хрупкость материалов при ультразвуковом воздействии и важны для понимания механизмов усталостного разрушения в различных условиях нагружения, что в свою очередь необходимо для понимания разрушения сонотродов, поэтому переходим к следующему разделу понимания разрушения.

## **1.8 Анализ разрушения сонотродов**

Анализ представленных данных позволяет сделать вывод о значительном потенциале ультразвуковых колебательных систем в различных отраслях производства. Однако, как и любая технологическая аппаратура, эти системы подвержены постепенному разрушению под воздействием ряда факторов и основные причины деградации сонотродов это:

- Недостатки в проектировании, ошибки и несовершенство геометрических параметров, неоптимальное распределение нагрузок в конструкции;
- Внутренние неоднородные структуры материала, наличие исходных микродефектов, несоответствие материала эксплуатационным требованиям;
- Проблемы в соединении, локальные напряжения в резьбовых узлах, неравномерное распределение нагрузок в местах креплений, постепенное

ослабление соединений при циклических нагрузках, в том числе вибрацию.

Экспериментальное подтверждение факторов разрушения, это проведенные исследования соноотродов наглядно демонстрируют влияние различных дефектов на работоспособность оборудования, наглядный пример на рисунке 23, наблюдается значительная деформация соноотрода, основной причиной является термическая перегрузка конструкции, это свидетельствует о том, что есть недостаток теплового расчета, не совершенствование системы охлаждения, ошибка в выборе рабочих параметров, так же рассмотрим другой пример на рисунке 24, разрушение в зоне сварного соединения, причиной является специальные включения в пластиковом материале, что может характеризовать необходимость совершенствования производственного процесса и материалов как соноотродов, так и пластиковых элементов.



Рисунок 23 – Соноотрод с дефектом



Рисунок 24 – Сонотрод с дефектом

Проведенный анализ в условиях производственного процесса выявил существенную проблему в эксплуатации ультразвуковых комплексов и их систем и при подробном рассмотрении данной проблемы, выяснено, что на сегодняшний день преобладает подход простой замены вышедших из строя компонентов после выявления бракованной продукции или ошибки оборудования, а так же отсутствует системный анализ причин отказов вышедших из строя элементов ультразвуковых комплексов, что в свою очередь ведет к недостаточному вниманию к такой тонкой науке, как диагностика разрушений элементов систем.

Выводы по разделам:

Для обеспечения надежной и без отказной работы оборудования систем сварочных комплексов, необходимо совершенствовать методы проектирования элементов и узлов, оптимизировать подбор материалов и сплавов, разрабатывать необходимые способы для пути анализа проблем связанные с разрушением сонотродов в ультразвуковых комплексах и системах производственного процесса.

Выбор материала для изготовления оснастки для ультразвуковой сварки зависит от множества факторов, включая прочность, устойчивость к коррозии,

теплопроводность и условия эксплуатации, так же необходимо учитывать желаемую производительность, это является важным фактором, что влияет на фактор усталостных характеристик., исходя из анализа табличных данных представленных в таблицах 1, 2, 3, перспективным материалом является ВТЗ, так как у него самые необходимые характеристики и соотношение цена и качество в самом лучшем диапазоне.

Эти меры позволят максимально реализовать потенциал ультразвуковых технологий при минимизации рисков преждевременного выхода элементов оборудования из строя, что в свою очередь ведет к ухудшению качества и привлечения дополнительных затрат на замену элементов и доработки бракованной продукции при непроварах и прочих дефектах.

В нашем случае нужна максимальная надежность и прочность, что в нашем случае гарантирует качество выпускаемой продукции в автоматическом режиме, без вмешательства ручной точечной доварки в случае сбоя или отказе в работе и в данной активно нам лучше подойдет материал титан марки ВТЗ-1, но для проверки нашей концепции необходимо провести экспериментальную часть.

## 2 Разработка методики для проведения исследований на оборудовании

Исследование ультразвуковой сварки выполняется с целью, определения влияния параметров материала соноtroда на качество сварных точек пластиковой обивки двери LADA VESTA NG, для избежание ошибочных результатов, необходимо выбрать определенное место и соноtroд для сварки данной точки, по согласованию с производством выбрали зону с повышенным процентом бракованных деталей (Рисунок 25)

Исследования проводили непосредственно в условиях производства на ультразвуковых сварочных машинах

### 2.1 Определение объекта исследования

Первым делом были выбраны в качестве объекта исследований точки сварки на обивке из пластика автомобиля LADA VESTA NG изображенные на рисунке 25 и сварочный соноtroд цилиндрический рисунок 26:

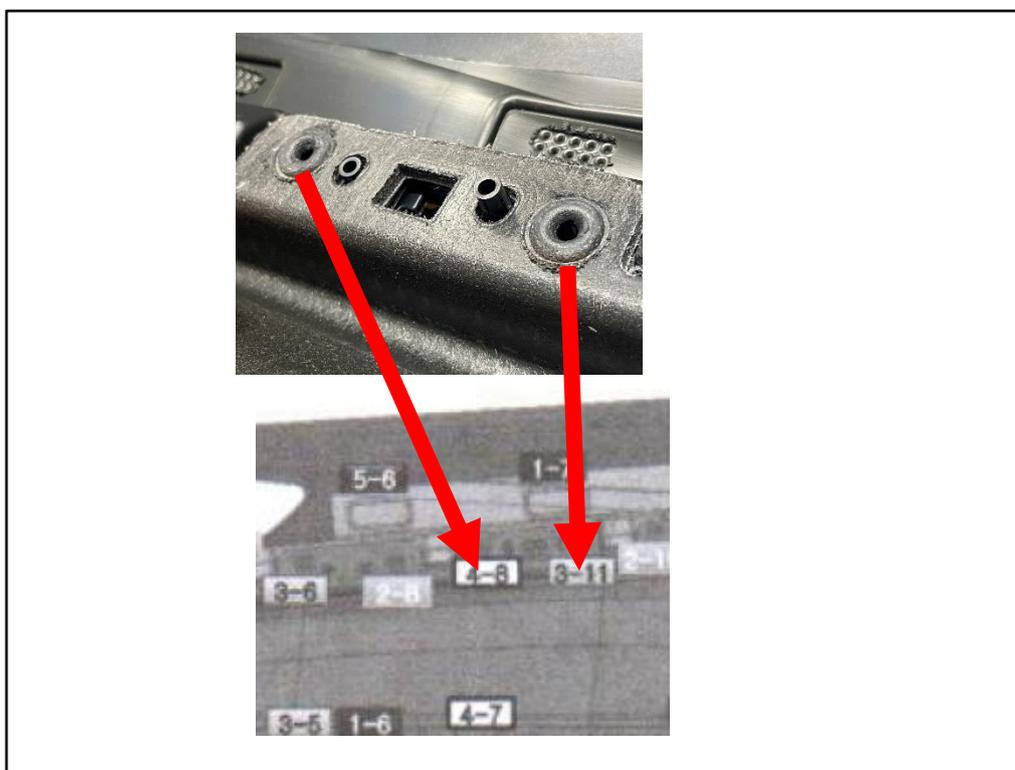


Рисунок 25 – Визуализация сварочных точек

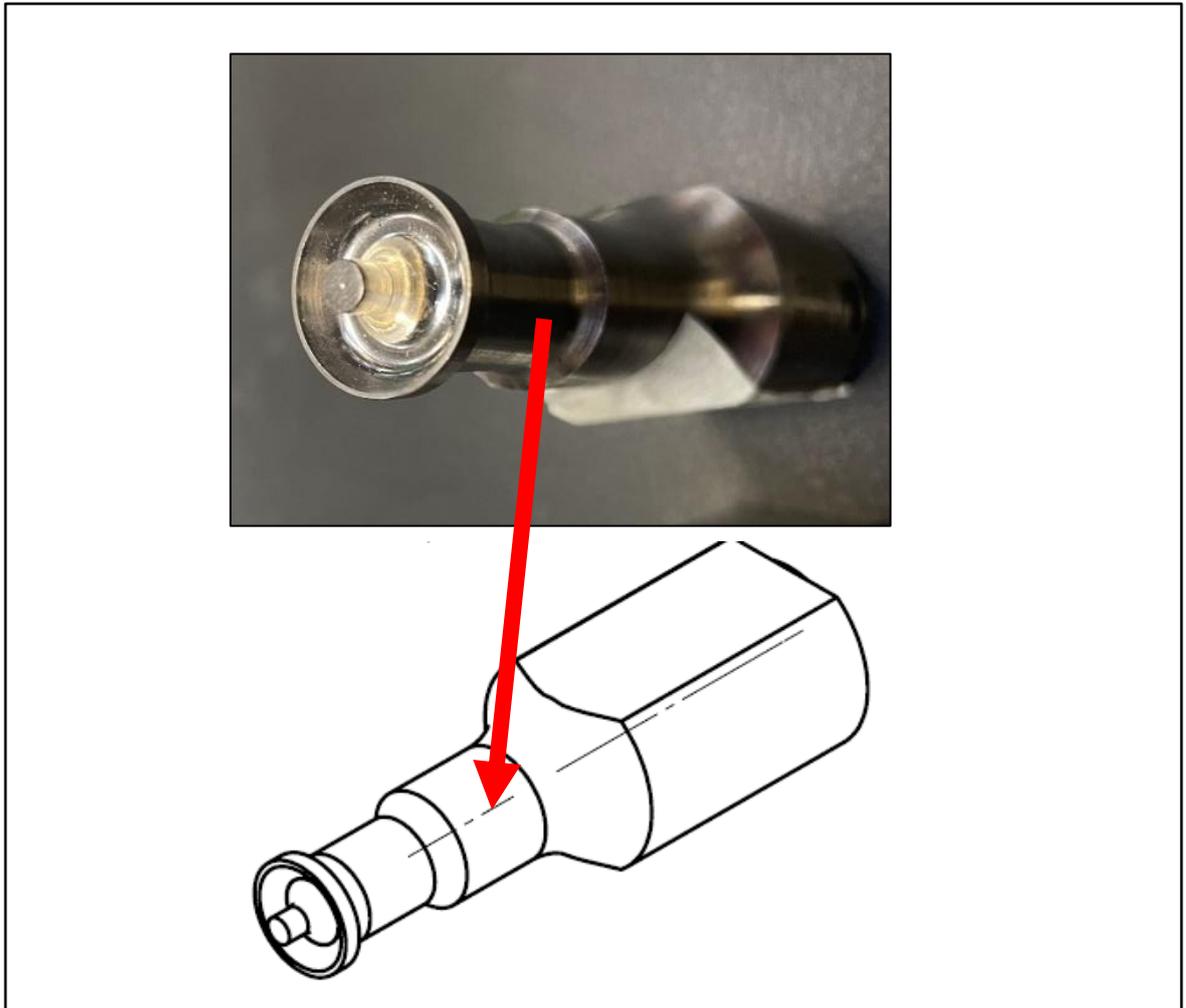


Рисунок 26 – Визуализация сонотрода цилиндрической формы.

Для производства дверных панелей автомобилей LADA VESTA NG применяется современный композитный материал – полипропилен (PP), обладающий ключевыми преимуществами, такие как механические, а именно высокая прочность на разрыв и изгиб, оптимальная жесткость при малом удельном весе, устойчивость к ударным нагрузкам и вибрации, эксплуатационная стойкость, низкая избираемость поверхности, коррозионная инертность к влаге, маслам, техническим жидкостям, химическая устойчивость к агрессивным средам.

Кроме того, этот полимер легко поддается термической обработке, позволяя надежно соединять элементы методом сварки, наносить покрытия на металл, ткань и даже картонные поверхности. Именно благодаря сочетанию всех

перечисленных свойств выбор производителя пал именно на полипропилен, поскольку он наилучшим образом удовлетворяет строгим техническим требованиям, применяемым к материалам внутренней отделки автомобильного интерьера, включая дверные панели. Физико-технические параметры так же зачастую повлияли на выбор материала, выраженные диэлектрические характеристики, минимальная теплопроводность и температурная стабильность в диапазоне от -30 до +100 градусов по Цельсию, данные параметры материала соответствуют современным требованиям и экологичности в серийном производстве.

Для изготовления сонотрода поставщиком использовался алюминиевый сплав марки Д16Т. Однако практика показала, что этот материал недостаточно долговечен: срок службы снаряда составлял менее 1200 рабочих циклов, что приводило к быстрому износу и выходу его из строя. В результате возникала необходимость применять резервные ремонтные технологии для завершения процесса сварки обивки автомобильных дверей. Это негативно сказывалось на качестве конечного продукта.

Более того, ограниченная стойкость выбранного материала привела к дефициту запасных частей для регулярного обслуживания и замены изношенных узлов в процессе производства опытной серии деталей обивки дверей. После наложенных международных ограничений значительно усложнился доступ к поставщикам необходимых комплектующих, затрудняя заказ новых изделий и вызывая дополнительные трудности на этапе запуска серийного выпуска продукции.

Практически оценить прочность и качество сварного шва пластиковых деталей позволяет эффективный метод — проведение многократных нагрузочных тестов. Такие испытания позволяют проверить стабильность характеристик соединений и определить максимальный эксплуатационный ресурс изделия в реальных условиях эксплуатации.

## 2.2 Описание эксперимента на сварочной машине

В качестве оборудования объекта исследования были выделены ультразвуковые сварочные машины, которые в первом полугодии 2022 года в ходе поставки оборудования для ультразвуковой сварки (производитель ф. «СЕМАС», Корея) обивок дверей согласно списку, были смонтированы и запущены на производстве пластмассовых изделий завода АО АВТОВАЗ:

- ультразвуковая сварочная машина для сварки обивки передней двери левой 8450040369, код.№ 92.1222.7004.99420.Q;
- ультразвуковая сварочная машина для сварки обивки передней двери правой 8450040368, код.№ 92.1222.7005.99420.Q;

На рисунке 27 можем рассмотреть УЗСМ и ее шаговую сварки детали обивки двери, контролируемые точки сварки и группа соноотродов участвующие в исследовании находятся в шагах 3 и 4.

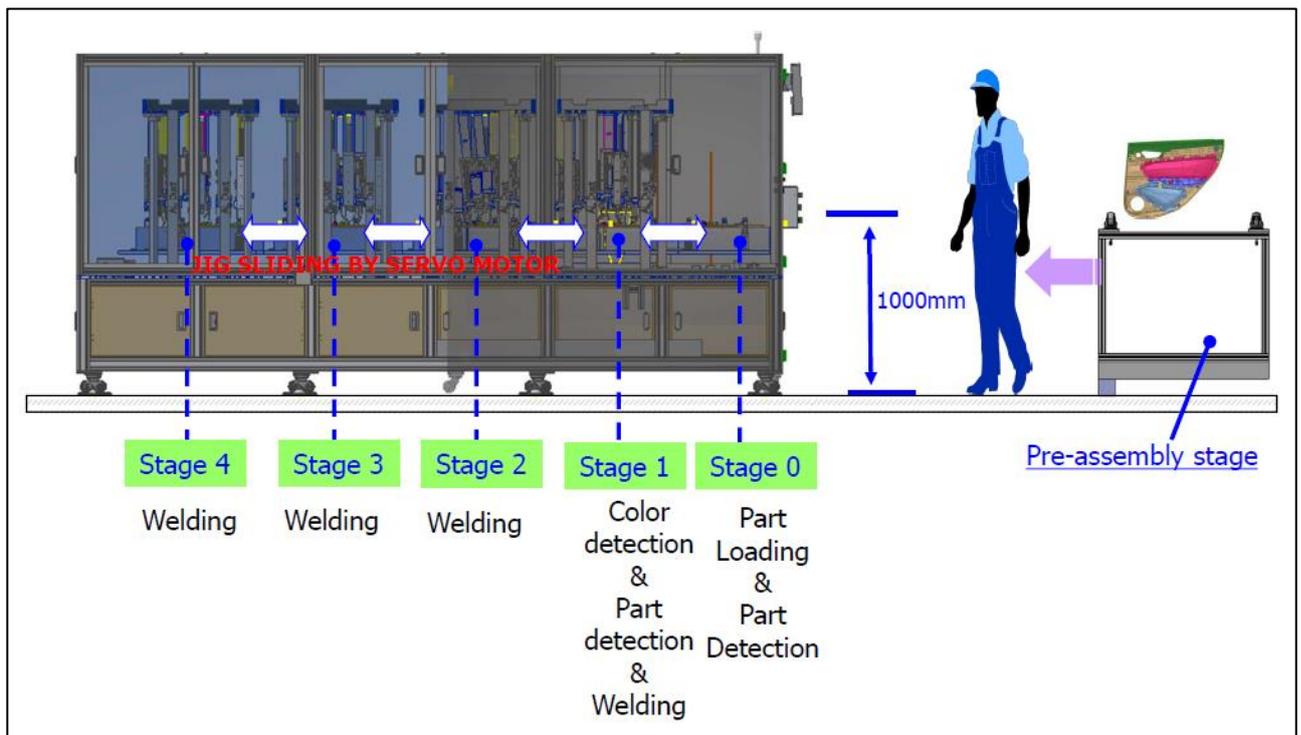


Рисунок 27 – УЗСМ код.№ 92.1222.7004.99420.Q.

Для проверки воспроизводимости качества и подбора материала соноотродов используют различные методы и проверки, для расставления

приоритетов был выбрана методика, отвечающая нашим целям, это качество сварки, при котором не будет требоваться ручная доварка точек сварки при сбоях оборудования в виде отхода соноотродов во время сварки партии обивок дверей LADA VESTA NG.

Цель нашего исследования заключается в разработке метода количественной оценки внешнего вида и прочностных характеристик сварных швов, выполненных ультразвуковой сваркой. Была выбрана методика механических испытаний непосредственно в сварочном оборудовании, позволяющая проводить тестирование в условиях реального производственного цикла.

Методика предусматривает использование ультразвукового сварочного аппарата фирмы SEMAS (Корея), работающего на частоте генератора-преобразователя-бустера около  $35\ 000 \pm 30$  Гц. Испытания проводятся циклическими тестами, состоящими минимум из 12 последовательных циклов, имитирующих условия реальной эксплуатации. Каждое такое испытание включает две ключевые стадии:

1. Проверка способности материала образовывать качественные сварочные швы («свариваемость»), данный процесс будет запущен в автоматическом режиме с контролем показателей ультразвуковой сварочной машины, проверка стенда происходит вручную и при сбоях в работе на экране монитора, мы сразу же можем увидеть, где именно и в какой группе произошел сбой.

2. Оценка предела прочности сварного соединения путём проведения тестирования до полного разрушения образца («испытание до отказа»), которое должно выдержать свыше 20 000 циклов нагрузки при успешном выполнении процедуры сварки.

Данная методика предназначена для оптимизации режимов настройки ультразвукового оборудования в рамках этапа пусконаладочных работ и повышения стабильности производственных процессов, а также успешному подбору необходимого материала для группы соноотродов на заранее выбранной группе.

Результаты, полученные в рамках данной методики, будут записываться в таблицу 6, для мониторинга и проведению статического анализа для наработки мероприятий и действий по отклонениям, а также результаты будут является подтверждением выбранной стратегии по поиску необходимого материала сонотродов для ультразвуковой сварочной машины.

Таблица 5 – Результаты испытаний опытных образцов

Кодовый № сонотрода (для заказа закупки)	Эскиз	Частота генератора, Гц	Частота "цепочки" генератор-преобразователь-бустер, Гц	Результаты измерения частоты резонанса сонотрода, Образцы А, Гц	Оценка возможности сварки	Мероприятия
MDM00000017384		35000+-10	35000+-30			

После заполнения таблицы и полученных данных, можно поэтапно пробовать подбирать материал и смотреть за статистикой качества сварки и стойкости испытания «до износа».

Выводы по разделам:

Для оценки надежности сварных элементов конструкции ультразвуковых сварочных машин, применяется много цикловой ресурсный тест, рассчитанный на проверку воспроизводимого качества и на расчет максимального ресурса элементов оборудования в рабочих режимах.

Важным аспектом является отсутствие запасных волноводов (сонотродов) для периодической замены, вышедших из строя, этим аспектом мы подчеркиваем важность данной работы по подбору материала, так как этот шаг был единственным и важным решением, для запуска проекта LADA VESTA NG.

### 3 Анализ результатов исследования

В ходе исследования было принято решение, что допущенный брак будет успешно устранен по технологии ручной доварки и трудозатраты должны быть минимальны, но ход и результаты исследования принесут более весомый вклад в дальнейших работах по улучшению производственного процесса направленный на качество.

#### 3.1 Результаты испытаний

В ходе исследования на первом этапе испытаний были испытаны образцы от производства ПТО, Д16Т, данные образцы были изготовлены с учетом точной копии сонотродов, пришедших вместе с оборудованием от поставщика и согласно методике, было заранее выбрано кол-во циклов, и оценка возможности по методике «до отказа» данные испытаний были занесены в таблицу 7:

Таблица 6 – Результаты первого этапа испытаний опытных образцов.

Кодовый № сонотрода (для заказа закупки)	Эскиз	Частота генератора, Гц	Частота "цепочки" генератор-преобразователь-бустер, Гц	Результаты измерения частоты резонанса сонотрода (производство ПТО, Д16Т), Образцы А, Гц	Оценка возможности сварки	Мероприятия
MDM00000017384		35000±10	35000±30	34970	ОК, 120 циклов - разрушение	1. Проработать переход на титан BT1-0.
				34970	ОК, 80 циклов - разрушение	
				34770	НОК	
				34890	НОК	
				34980	ОК, 60-70 циклов - разрушение	
				34580	НОК	
				34650	НОК	
				34660	НОК	
				34780	НОК	
				34770	НОК	
				34910	НОК	
34880	НОК					

Исходя из данных первый опыт с материалом Д16Т не удался, образцы имели сильный износ и очень часто происходили сбои в процессе сварки, количество циклов не превышало 120 циклов, что говорит нам о том, что

устойчивость с данным материалом, в условиях больших объемов производства, не подходит для данной группы соноотродов и сварочных точек на обивке двери LADA VESTA NG, износ образца можем наблюдать на рисунке 28,



Рисунок 28 – Результаты испытаний с материалом Д16Т

После определенных выводов и результата испытаний образцов с материалом Д16Т, мы согласно ранее собранным данным по характеристикам материала подбираем следующий и переходим ко второму этапу испытаний, на котором планируем выбрать материал более прочный, такой как титан марки ВТ1-0.

На втором этапе испытаний были испытаны образцы производства ПТО, ВТ1-0, так же согласно методике, выбранной ранее данные испытаний были так же занесены в таблицу 8:

Таблица 7 – Результаты второго этапа испытаний опытных образцов.

Кодовый № сонотрода (для заказа закупки)	Эскиз	Частота генератора, Гц	Частота "цепочки" генератор- преобразоват ель-бустер, Гц	Результаты измерения частоты резонанса сонотрода (производство ПТО, BT1-0), Образцы С. Гц	Результат испытаний на оборудовании	Мероприятия
MDM00000017384		35000+-10	35000+-30	35020	ОК, 140 циклов - потеря частоты	1. Переход на титан BT3-1. 2. Опытные поставки ТГУ.
				34980	ОК, 140 циклов - потеря частоты	
				35010	ОК, 140 циклов - потеря частоты	
				35000	ОК, 140 циклов - потеря частоты	
				35030	ОК, 140 циклов - потеря частоты	
				35090	NOK	
				35020	ОК, 140 циклов - потеря частоты	
				35010	ОК, 140 циклов - потеря частоты	
				34990	ОК, 140 циклов - потеря частоты	
				35050	NOK	
				35020	ОК, 140 циклов - потеря частоты	
				35030	ОК, 140 циклов - потеря частоты	

Данные показывают положительную тенденцию к материалу титан марки BT1-0, но есть недочеты и необходимо продолжать испытания, во время испытаний титан показал свою эффективность, но для бесперебойной работы в режиме «до отказа» образцы теряли свойства и качество ухудшалось, так же можем заметить малое количество циклов, что означает малую устойчивость в условиях производства, при визуальном осмотре мы можем видеть повышенный износ образцов на рисунке 29.



Рисунок 29 – Результаты испытаний с материалом ВТ1-0.

После полученных выводов переходим к третьему этапу испытаний и в при следующем шаге испытаний, согласно изученным материалом, планируется переход на марку титана ВТЗ-1, которая должна будет превзойти наши ожидания, но только с помощью реального теста в условиях производства мы можем убедиться и обосновать наши доводы.

На третьем этапе испытаний были испытаны образцы соноотродов производства ТГУ марки ВТЗ-1, отмечу тот факт, что в лабораторных условиях университета проводится комплексное исследование волноводов, направленное на анализ их эксплуатационных характеристик и оптимизацию конструкций. Изучаемые образцы различаются по ряду ключевых параметров такие как форма, материал, назначение. Полученные данные испытаний образцов в производстве пластмассовых изделий, были так же занесены в таблицу 9 после проведения эксперимента:

Таблица 8 – Результаты третьего этапа испытаний опытных образцов.

Кодовый № сонотрода (для заказа закупки)	Эскиз	Частота генератора, Гц	Частота "цепочки" генератор-преобразователь-бустер, Гц	Результаты измерения частоты резонанса сонотрода (производство ТГУ, ВТЗ-1), Образцы D. Гц	Результат испытаний на оборудовании
MDM00000017384		35000±10	35000±30	35020	OK, стойкость до отказа 19200-19600 ц.
				35000	OK, стойкость до отказа 19200-19600 ц.
				35000	OK, стойкость до отказа 19200-19600 ц.
				35000	OK, стойкость до отказа 19200-19600 ц.
				35000	OK, стойкость до отказа 19200-19600 ц.
				35010	OK, стойкость до отказа 19200-19600 ц.
				35000	OK, стойкость до отказа 19200-19600 ц.
				35000	OK, стойкость до отказа 19200-19600 ц.
				34990	OK, стойкость до отказа 19200-19600 ц.
				35000	OK, стойкость до отказа 19200-19600 ц.
				35000	OK, стойкость до отказа 19200-19600 ц.
				35000	OK, стойкость до отказа 19200-19600 ц.

После испытаний с материалом марки ВТЗ-1, мы видим положительную тенденцию по выбору материала для в сонотродов, так же после визуального осмотра сонотрода после испытаний «до отказа» мы видим небольшой износ, в рамках допустимого, стойкость превысила 19200 циклов, что кратно превышает прежние значения ранее достигнутых успехов с титаном марки ВТ1-0, визуальный осмотр можно увидеть на рисунке 30



Рисунок 30 – Результаты испытаний с материалом ВТ3-1

Сравнительные данные испытаний демонстрируют существенное улучшение характеристик сварных соединений при замене алюминиевого сплава Д16Т на титановый сплав ВТ3-1, отметим ключевые преимущества перехода на ВТ-3, такие как повышение надежности, увеличение циклической стойкости свыше 19 000 циклов, более стабильное формирование сварного шва, улучшенное сохранение геометрии при термоциклировании, срок службы инструмента увеличен более чем в 2 раза, снижение затрат на обслуживание и доварку бракованной продукции в случае сбоев в работе.

Сравнительный анализ показал, что для ответственных узлов с динамическими нагрузками предпочтителен материал ВТ3-1, а для экономии бюджета в статичных конструкциях, где меньше темп и нагрузка оборудования, допустимо применение Д16Т.

Данные подтверждают перспективность титановых соноотродов в высоконагруженных УЗ-системах.

### **3.2 Анализ полученных результатов.**

После проведенного эксперимента получены достаточно весомые данные для составления выводов, планов действий, а также наработки мероприятий для достижения целей и задач данной диссертационной работы, рассмотрим основные выводы:

- После завершения первого этапа испытаний в производственном цикле с материалом который был утвержден при проектировании поставщиком ультразвуковых сварочных машин и комплексов, а именно дюралюминий марки Д16Т, было выявлено следующее, что образцы соноотродов имели сильный преждевременный износ и с высокой периодичностью, что в свою очередь приводили к тому, что происходили сбои оборудования в процессе сварки, износ образца критичен и не приемлем в условиях высокого темпа производственного процесса и данный материал для ультразвуковых сварочных комплексов попросту не подходит и не соответствует ожиданиям, что следует в свою очередь рассмотреть более прочный материал, чем является титан марки ВТ1-0.

- Исходя из данных второго этапа испытаний в производственном цикле обновленные образцы соноотродов марки ВТ1-0 показывают положительную тенденцию, но всё-таки есть недочеты и необходимо продолжать эксперимент по подбору необходимого материала, так же во время испытаний титан показал свою эффективность, но для бесперебойной работы в режиме «до отказа» образцы теряли свойства и качество ухудшалось, при визуальном осмотре мы можем видеть повышенный износ соноотрода, в нашем случае было принято решения повышения уровня прочности, для этого была выбрана улучшения версия марки материала титан, такая как ВТ3-1

- После заключительного третьего этапа испытаний с материалом марки ВТ3-1, мы видим положительную тенденцию по выбору материала для

сонотродов, так же после визуального осмотра сонотрода после испытаний «до отказа» мы видим небольшой износ, в рамках допустимого.

Можем отметить, что смена материала от поставщика ф. «СЕМАС», Корея УЗСМ алюминия марки ДТ16Т на титан марки ВТ3-1, мыкратно повысили качество сварки и повысили стойкость элементов оборудования УЗСМ, сравнительные данные испытаний демонстрируют существенное улучшение характеристик сварных соединений при замене алюминиевого сплава Д16Т на титановый сплав ВТ3-1, отметим ключевые преимущества перехода на ВТ-3, такие как повышение надежности, увеличение циклической стойкости свыше 19 000 циклов, более стабильное формирование сварного шва, улучшенное сохранение геометрии при термоциклировании, срок службы инструмента увеличен более чем в 2 раза, снижение затрат на обслуживание и доварку бракованной продукции в случае сбоев в работе, данные подтверждают перспективность титановых сонотродов в высоконагруженных УЗ-системах что подразумевает под собой четкие действия, которые помогут быстрой переналадки оборудования в различных проектах производства АО «АВТОВАЗ» и в частности производства пластиковых изделий.

## Заключение

Настоящее исследование представляет собой первый масштабный этап изучения возможностей модернизации конструкций соноотродов для ультразвукового сварочного оборудования (УЗСМ) применительно к процессу производства пластиковых деталей предприятия АО «АВТОВАЗ». Цель проекта заключалась в постепенном внедрении нового, более устойчивого материала и проверке его работоспособности в производственных условиях, оценке влияния на итоговое качество готовых изделий и повышение эффективности работы техники вплоть до исчерпания её ресурса («до отказа») на примере обивок дверей модели LADA VESTA NG и соноотрода цилиндрической формы производства ТГУ.

Таблица 9 – Результаты третьего этапа испытаний опытных образцов.

Кодовый № соноотрода (для заказа закупки)	Эскиз	Частота генератора, Гц	Частота "цепочки" генератор-преобразователь-бустер, Гц	Результаты измерения частоты резонанса соноотрода (производство ТГУ, ВТЗ-1), Образцы D. Гц	Результат испытаний на оборудовании
MDM00000017384		35000+-10	35000+-30	35020	ОК, стойкость до отказа 19200-19600 циклов
				35000	ОК, стойкость до отказа 19200-19600 циклов
				35000	ОК, стойкость до отказа 19200-19600 циклов
				35000	ОК, стойкость до отказа 19200-19600 циклов
				35000	ОК, стойкость до отказа 19200-19600 циклов
				35010	ОК, стойкость до отказа 19200-19600 циклов
				35000	ОК, стойкость до отказа 19200-19600 циклов
				35000	ОК, стойкость до отказа 19200-19600 циклов
				34990	ОК, стойкость до отказа 19200-19600 циклов
				35000	ОК, стойкость до отказа 19200-19600 циклов
				35000	ОК, стойкость до отказа 19200-19600 циклов

Проведённые эксперименты подтвердили нашу изначальную гипотезу: применение материала из титана марки ВТЗ-1 повышает надёжность и прочность сварных соединений, гарантируя высокое качество продукции, изготавливаемой автоматически, без привлечения операций ручной коррекции в случае сбоев и поломок оборудования ультразвуковой сварочной машины обивок дверей LADA VESTA NG.

## Список используемой литературы

1. Бараз В.Р. Применение программы Excel для статистических расчетов в материаловедении: учебное пособие. - Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – 46 с.
2. Волков С.С. и др. Сварка пластмасс ультразвуком/ С.С. Волков, Ю.Н. Орлов, Б.Я. Черняк. М., Химия, 1974. – 264 с.
3. Волков С. С., Орлов Ю. Н., Астахова Р. Н., Сварка и склеивание пластмасс. М., 1972. - 398 с.
4. Волченко В.Н. Сварка и свариваемые материалы т.1. -М. 1991. 32-71 с.
5. Гаряев, П. В. Ультразвуковая сварка в машиностроении / П. В. Гаряев. – М.: Машиностроение, 2018. – 256 с.
6. ГОСТ 14359-1969. ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР. ПЛАСТМАССЫ. Методы механических испытаний. Общие требования. М.: Издательство стандартов, 1993.
7. ГОСТ 16310-80 Соединения сварные из полиэтилена, полипропилена и винилпласта. Основные типы, конструктивные элементы и размеры (с Изменением N 1). М.: ИПК Издательство стандартов, 1997.
8. ГОСТ 26996-86 Полипропилен и сополимеры пропилена. Технические условия. (с изменениями №№1,2). М.: ИПК Издательство стандартов, 2022.
9. ГОСТ 11262-2017 МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. Пластмассы. Метод испытаний на растяжение. М.: Стандартиформ, 2018.
10. ГОСТ 32794-2014 МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. КОМПОЗИТЫ ПОЛИМЕРНЫЕ. М.: Стандартиформ, 2015.
11. Дятлов Р. Н. Автоматизация обработки материалов концентрированными потоками энергии: учебное пособие / Р. Н. Дятлов. — Рязань: РГРТУ, 2020. — 64 с.

12. Завгородний В.К., Калинин Э.Л., Махаринский Е.Г., Оборудование предприятий по переработке пластмасс, изд. «Химия», Л., 1972, стр. 464, рис.263, табл. 34.
13. Иванов, А. Н. "Совершенствование технологии ультразвуковой сварки в автомобилестроении" // «Сварочное производство». – 2021. – № 5. – С. 34–39.
14. Козлов, Л. А. «Технология ультразвуковой сварки металлов и полимеров» / Л. А. Козлов, И. В. Петров. – СПб.: Профессия, 2020. – 320 с.
15. Котеров А.Н., Ушенкова Л.Н., Зубенкова Э.С., Калинина М.В., Бирюков А.П., Ласточкина Е.М., Молодцова Д.В., Вайнсон А.А., Сила связи. Сообщение. Градации величины корреляции. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019 Том 64. № 6. С. 12-24. DOI: 10.12737/1024-6177-2019-64-6-12-24.
16. Крылов, В. А. "Перспективные технологии ультразвуковой сварки в автомобилестроении" // \*Материалы Междунар. науч.-техн. конф. "Сварка-2022"\*. – М., 2022. 89–94 с.
17. Лекки Б. Сварка пластмасс: основы. [Электронный ресурс]. URL: [www.omnexus.com](http://www.omnexus.com) (дата обращения 22.02.2025).
18. Масанский О. А., Ковалева А. А., Гильманшина Т. Р. / Материаловедение: учебник / — Красноярск: СФУ, 2020. — 300 с
19. Николаев Г. А., Ольшанский Н. А., Новые методы сварки металлов и пластмасс. М., 1966. - 220 с.
20. Описание типа средства измерений системы для индикаторов ИЧ и ИЧЦ. Приложение к свидетельству № 62552 об утверждении типа средства измерений. 47–99 с.
21. Официальный сайт АО "АВТОВАЗ". [Электронный ресурс]– URL: <https://www.avtovaz.ru> (дата обращения 13.03.2025).
22. Петров С. К. "Влияние параметров ультразвуковой сварки на

прочность соединений" // \*Вестник машиностроения\*. – 2020. – № 7. 45–50 с.

23. Расторгуев Д.А. Неметаллические материалы в машиностроении: практикум / Д.А. Расторгуев. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2019. – 84 с.

24. Сварка пластмасс. [Электронный ресурс]. URL: [https://studbooks.net/1423579/tovarovedenie/osnovnye\\_vidy\\_osobennosti\\_svarki\\_plastmass](https://studbooks.net/1423579/tovarovedenie/osnovnye_vidy_osobennosti_svarki_plastmass) (дата обращения 13.03.2025).

25. Свойства пластмасс [Электронный ресурс]. URL: [https://e-plastic.ru/slovar/c/stepen\\_polimerizatsii/](https://e-plastic.ru/slovar/c/stepen_polimerizatsii/) (дата обращения 23.02.2025).

26. Сидоров В. Г. "Автоматизация контроля качества ультразвуковой сварки" // \*Автоматизация в промышленности\*. – 2022. – № 3., 22–27 с.

27. Спиридонов, Н.Г. Разработка технологии и оборудования для ультразвуковой сварки бампера автомобиля ВАЗ-21214 Urban: выпускная квалификационная работа: 15.03.01 / Н.Г. Спиридонов. – Тольятти: ТГУ, 2019. – 68 с.

28. Теоретические основы сварки/Под ред. В.В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1970. 692 с.

29. Тростянская Е. Б., Комаров Г. В., Шишкин В. А., Сварка пластмасс. М., 1967. - 365 с.

30. "Ультразвуковая сварка в промышленности" // [Электронный ресурс]. – URL: <https://elibrary.ru> (дата обращения 25.04.2025).

31. Холопов Ю. В. Ультразвуковая сварка М., Машиностроение, 1972. - 224 с.

32. Graff, K. F. \*Ultrasonic Welding of Metals\* / K. F. Graff. – Ohio: Ohio State University, 2014. – 210 p. 156 с.

33. Kirkland, T. Ultrasonic Welding: The Need for Speed Control/ T. Kirkland - Plastics Decorating, 2012. 73 – 88 с.

34. Klamecki, B.E. A Thermodynamic Model of Friction / B.E. Klamecki // Wear, 1980. №2. 113 – 120 c.
35. Klamecki, B.E. Guide to Ultrasonic Plastics Assembly/ B.E. Klamecki // Dukane Part, 2011 – 101 – 120 c.
36. Leaversuch, R.C. How to Use those Fancy Ultrasonic Welding Controls/ R.C. Leaversuch // Plastics Technology. 2002. 98 – 120 c.
37. 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 c.