

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

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

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

22.04.01 Материаловедение и технологии материалов
(код и наименование направления подготовки, специальности)
«Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических
материалов»
_____ (направленность (профиль/специализация))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему: Исследование влияния покрытий на износостойкость торцов волноводов при ультразвуковой сварке стеклонаполненных полимеров

Студент	<u>Д.Р. Нурмеев</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
Научный руководитель	<u>к.т.н., доцент О.В. Шашкин</u> (ученая степень, звание, И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
Консультант(ы)	<u>м.н.с., Спиридонов Н.Г.</u> (ученая степень, звание, И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)

Тольятти 2025

Содержание

Введение.....	3
1 Технологические возможности применения ультразвуковой сварки в автомобильной промышленности	5
1.1 Анализ и перспективы применения пластиков в автомобильной промышленности.....	5
1.2 Анализ существующих методов сборки пластиковых изделий.....	13
1.3 Принцип и физические основы ультразвуковой сварки	21
1.4 Обзор технических решений в области ультразвуковой сварке	30
1.5 Ультразвуковая сварка изделий из армированных стекловолокном полимеров	34
2 Разработка методики и оборудования для проведения исследований	41
2.1 Описание объекта исследований.....	41
2.2 Оборудование для проведения экспериментальных исследований	45
2.2.1 Проектирование ультразвуковой колебательной системы.....	45
2.2.2 Проектирование ультразвукового генератора	52
2.3 Разработка методики исследования износостойкости волноводов	54
3 Анализ результатов исследований	59
3.1 Анализ износа волноводов без покрытия.....	59
3.2 Анализ износа волноводов с различными типами покрытий	60
Заключение	71
Список используемых источников.....	72

Введение

С каждым годом различные отрасли начинают выпускать все больше изделий, которые изготовлены из полимерных материалов, а не металлов и сплавов.

Доказательство такого спроса отмечено в отчетах всемирной онлайн базы данных KI Polyglobe. По их данным растущие объемы выпуска полимерных материалов в 2020 году превысили показатель в 330 миллионов тонн. Из них почти 90 процентов составили обыкновенные виды полимерных материалов, а примерно 10 процентов – композитные полимеры [14].

По прогнозам Европейской Ассоциации производителей пластиковых изделий, Plastics Europe можно сделать вывод, что ежегодный прирост объемов стандартных термопластичных полимерных материалов составит около 5 процентов. Также наблюдается прирост объемов производства изделий из композитных полимерных материалов на 5 процентов. И данные показатели будут только расти.

Одним из факторов такого бурного роста производства композитных полимерных материалов специалисты называют повышенный интерес к новым видам композитных полимеров, обладающих уникальными физико-механическими свойствами, которые соизмеримы, а иногда и превосходят свойства часто используемых конструкционных сталей и сплавов. Также они обладают низкой плотностью, имеют большую стойкость к коррозии в агрессивных средах и дешевле в производстве [19].

Более того ежегодно разрабатываются и выпускаются десятки новых видов полимерных термопластичных композитных материалов, имеющие в составе различного рода модификаторы, такие как стекловолокно или углеволокно [16].

Однако, появление материалов с новыми свойствами заставляет производителей пластиковых изделий задумываться об улучшении

имеющихся и поиску новых методов сборки, для обеспечения стабильности производства.

К популярным и востребованным методам сборки пластиковых изделий специалисты относят:

- крепежная сборка при помощи метизов;
- адгезионная сборка;
- сварка.

В последнее время все больший интерес у различного рода производителей вызывает метод сборки пластиковых изделий, который основан на вводе в соединяемые детали высокочастотных колебаний. Данный процесс называется ультразвуковая сварка, который имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами.

Однако, увеличение прочностных характеристик полимерных материалов приводит к возникновению повышенного износа на торцах рабочих волноводов в процессе ультразвуковой сварки композитных полимеров, что сказывается на уменьшении стабильности качества процесса сборки и срока службы ультразвуковых волноводов. В литературе данный аспект на сегодняшний день до конца остается не освещенным.

Именно поэтому целью работы является – повышение стабильности качества сварных точек при ультразвуковой сварке армированных стекловолокном полимеров, путем проведения исследований по влиянию различных покрытий на износ торцов волноводов.

1 Технологические возможности применения ультразвуковой сварки в автомобильной промышленности

1.1 Анализ и перспективы применения пластиков в автомобильной промышленности

В производстве автомобилей пластики и композиты начинают все чаще применяться. Основная причина этого – их преимущества перед другими материалами, например, металлами.

По данным центра автомобильных исследований «Ann-Arbor», наблюдается тенденция роста применения полимерных и композитных материалов для изготовления изделий в автомобильной промышленности. Согласно их прогнозам, количество пластика будет увеличиваться в среднем на два процента каждые пять лет (рисунок 1).



Рисунок 1 – Тенденции применения материалов в автомобилестроении

Данный рост специалисты объясняют появлением полимерных материалов, обладающих уникальными механическими и эксплуатационными свойствами, которые будут способствовать все большему их применению в автомобильной промышленности [6, 17].

Одним из наиболее перспективных направлений применения пластиков в автомобилестроении является использование полимеров, модифицированных различными добавками:

- стекловолокно – повышает прочность и жесткость материала;
- углеволокно – повышает механические свойства материалов;
- керамика – повышает прочность, жесткость и термостойкость материала.

Согласно отчету Research And Markets, мировой рынок модифицированных термопластичных полимерных материалов для автомобилестроения оценивался в 2019 году в размере 1.8 миллиарда долларов США и, как ожидается, вырастет до 5.3 миллиарда долларов США к 2025 году [10].

Кроме того, пластики и композиты используются для создания электромобилей. Согласно отчету Marketsand Markets, рынок пластиков для электромобилей оценивался в 7.4 миллиарда долларов в 2020 году и, как ожидается, вырастет до 14.2 миллиарда долларов к 2025 году. Это связано с тем, что пластики и композиты могут снизить вес электромобиля, что позволяет увеличить его пробег на одном заряде батареи [11].

Таким образом, использование пластиков и полимерных композиционных материалов для изготовления различных изделий, применяемых в автомобилестроительной промышленности является перспективным направлением и может принести значительные выгоды для производителей и потребителей.

Пластики делятся на две основные группы: терморезистивные и термопластичные. В автомобильной промышленности широкое применения

находят именно термопластичные полимерные материалы или термопласты, которые можно разделить на три большие группы, показанные на рисунке 2.

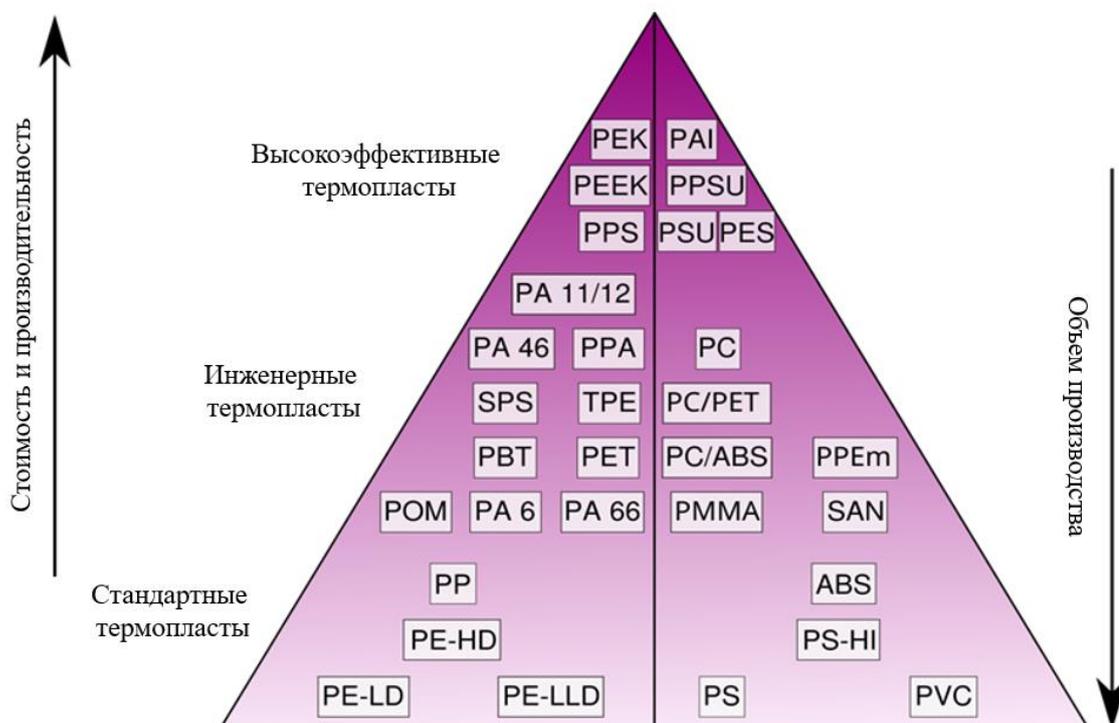


Рисунок 2 – Типы современных термопластов

К стандартным видам термопластичных полимерных материалов можно отнести:

- PE-LD – полиэтилен высокого давления. Благодаря низкой кристалличности является более гибким и мягким полимером, в отличие от PE-HD;
- PE-HD – полиэтилен низкого давления – твердый термопластичный полимер, имеющий низкое водопоглощение;
- PP – полипропилен – один из массово выпускаемых и востребованных полимерных материалов;
- PVC – поливинилхлорид – третий по объёму производства синтетический полимер из пластика (после полиэтилена и

полипропилена). Ежегодно производится около 40 миллионов тонн. Бывает жёстким и гибким. Добавление пластификаторов делает ПВХ более мягким и гибким

- PS – полистирол – прочный и бесцветный полимерный материал, пропускающей свыше 90 процентов лучей видимого света;
- PSНI – ударопрочный полистирол;
- ABS – акрилонитрилбутадиенстирол – один из представителей ударопрочных термопластичных полимерных материалов.

К инженерным термопластам относятся:

- POM – полиформальдегид – полимерный материал, обладающий высокой упругостью и эластичностью;
- PA 6 – полиамид 6 – термостойкий полимерный материал, состоящий из линейных синтетических высокомолекулярных соединений;
- PA 66 – полиамид 66 – это синтетический полимер, который является распространённым видом полиамидов. Он получается путём поликонденсации гексаметилендиамина и адипиновой кислоты, образуя прочную и устойчивую к износу полимерную цепь;
- PBT – полибутилентерефталат – это термопластичный инженерный полимер, который используется в качестве изолятора в электротехнической и электронной промышленности. Устойчив к растворителям, практически не даёт усадку при формовке;
- PET – полиэтилентерефталат – термопластик, распространённый представитель класса полиэфиров. Продукт поликонденсации этиленгликоля с терефталевой кислотой. Прочен, износостоек, хороший диэлектрик;
- SPS – синдиотактический полистирол – это полукристаллический пластик с исключительными свойствами;

- ТРЕ – термопластичный эластомер – это полимерный материал, который сочетает в себе свойства эластомера (гибкость, упругость, деформируемость) и термопласта (способность к формованию при нагревании);
- РА 46 – полиамид 46 – полукристаллический полимер с очень высокой механической и термической стойкостью в сравнении со всеми инженерными и тем более стандартными пластиками;
- РРА – полифталамид – инженерный полиамид. Имеет повышенную температуру плавления, температуру стеклования, химическую стойкость и жёсткость;
- РА 11/12 – полиамид 11 – это редкий инженерный пластик на биологической основе, который получают из возобновляемых источников (клещевины) и получают путем полимеризации аминокислоты, является одним из первых полимеров биологического происхождения. Температура плавления полиамида 11 составляет 190 °С. Полиамид 12 по своим свойствам аналогичен полиамиду 11, но отличается превосходной термостойкостью и стойкостью к ультрафиолетовому излучению, низким водопоглощением и меньшим воздействием на окружающую среду. Обладает хорошей ударной вязкостью и стабильностью размеров;
- РММА – полиметилметакрилат – высоко прозрачный термопласт. Также известен как оргстекло;
- SAN – стирольно-акрилонитрильная смола – смесь двух полимерных материалов стирола и акрилонитрила, обладающая высокой термостойкостью;
- PC/ABS – поликарбонат/акрилонитрил-бутадиен-стирол – смесь материалов PC и ABS, обеспечивающая уникальное сочетание технологичности ABS и превосходных механических свойств, термостойкости и ударопрочности PC;

- PPEm – полифениленэфир. Характеризуется выдающейся стабильностью размеров, низким поглощением воды, широким диапазоном температур, превосходными механическими и термическими свойствами;
- PC/PET – смесь поликарбоната и полиэтилентерефталата. Ударопрочный, химически стойкий материал. Обладает высокой прочностью, стойкостью к ударным нагрузкам в том числе при низких температурах;
- PC – поликарбонат – это промышленный термопластик. Он широко используется в автомобилестроении, аэрокосмической промышленности, медицине и многих других областях.

Из всех термопластов особое внимание уделяется высокоэффективным термопластичным материалам, так как именно они обладают свойствами близкими к некоторым металлам и сплавам, которые применяются во многих отраслях промышленности, в том числе и автомобилестроении.

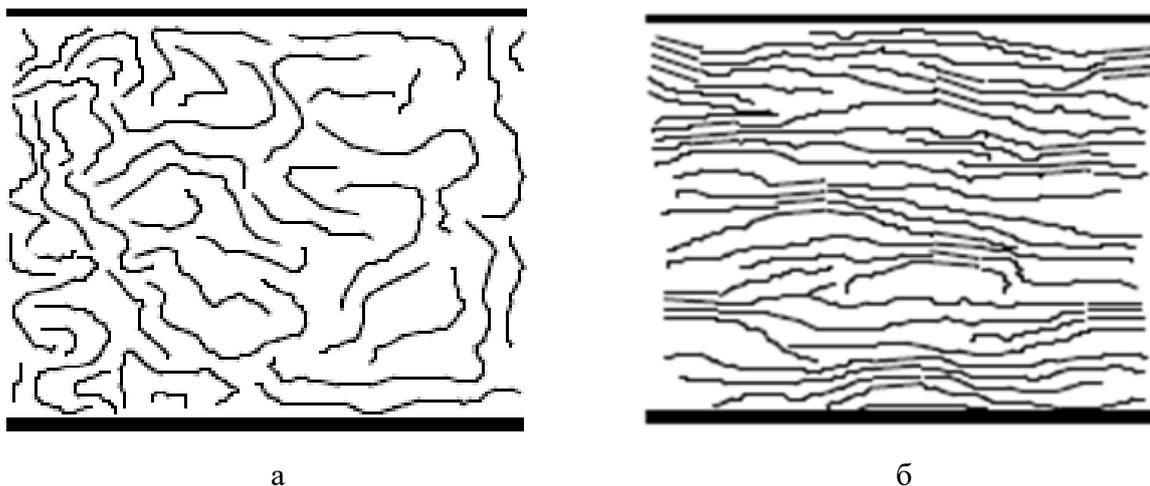
К таким материалам можно отнести:

- PPS – полифениленсульфид – термопластичный полимер, обладающий высокими показателями стойкости к химическим растворам, обладает высокой прочностью и плотностью;
- PEEK – полиэфирэфиркетон – один из самых распространённых термопластов в производстве. Из PEEK можно производить детали более прочные и лёгкие, чем из нержавеющей стали и алюминия, с чрезвычайно высокой термической, химической и физической износостойкостью. Этот материал подходит для аэрокосмической, автомобильной и химической промышленности;
- PEK – полиэфиркетоны – полимеры, молекулярная основа которых содержит чередующиеся кетоновые и эфирные функциональные группы. Таким образом, основа, которая является очень жёсткой, придаёт материалам очень высокие температуры стеклования и плавления по сравнению с другими пластмассами. Области

применения: высокопроизводительные литые детали, такие как подшипники, шестерни, уплотнительные кольца, фиксаторы клапанных пружин, крыльчатки. Покрытия из РЕК подходят для применения при температуре до 230 °С;

- PSU – полисульфон – это высококачественный прозрачный пластик с желтоватым оттенком. Применяется для изготовления конструкционных элементов, подверженных повышенным механическим, электрическим и тепловым нагрузкам;
- PES – полиэстер – полностью синтетический материал. Может быть, как плотной тканью, так и прозрачным кружевом или сеткой. Его внешний вид и характеристики зависят от химического состава исходного сырья, формы волокон и типа переплетения;
- PPSU – полифенилсульфон – это аморфный термопласт, в натуральном состоянии. Относится к семейству полисульфонов. Обладает превосходной стабильностью размеров, чрезвычайно низким дымообразованием, высокой стойкостью к радиации, высокой прочностью при растяжении, жёсткостью и твёрдостью в широком диапазоне рабочих температур;
- PAI – торлон – является самым твёрдым полимерным материалом и обладает наивысшей из всех пластиков термостойкостью. Свойства торлона: лёгкий вес, низкий коэффициент трения, негорючесть, устойчивость к воздействию многих агрессивных химических веществ [18].

Все современные термопластичные полимерные материалы, которые используются в промышленности для изготовления различного рода изделий, по внутренней структуре расположения мономерных молекул подразделяются на две группы. Схемы молекулярного строения данных материалов представлены на рисунке 3:



а - аморфные термопласты, б - кристаллические

Рисунок 3 – Виды структур пластиков

Аморфные полимеры имеют структуру, состоящую из молекул мономеров, собранных в цепочки и хаотично упорядоченные во всем объеме материала. Данные цепочки образуют так называемые пачки цепных молекул. Под воздействием тепловой энергии пачки могут перемещаться в материале, при этом сохраняется хаотичный порядок их расположения.

Структура кристаллических полимеров полная противоположность структуре аморфных полимеров. В ней макромолекулы также образуют пачки, однако, они выстраиваются в строго упорядоченном порядке, тем самым образуют пространственную кристаллическую решетку.

Структурные различия между видами полимерных материалов влияют на изменение их свойств и агрегатных состояний во время нагрева или полимеризации.

Например, благодаря хаотичному расположению макромолекул, полимерные материалы с аморфной структурой не обладают строго заданной температурой плавления. Таким образом при нагреве их агрегатное состояние постепенно из твердого переходит в жидкотекучие.

В полимерах с кристаллической структурой напротив наблюдается ярко выраженная точка десорбции на термической диаграмме. При их нагреве до заданной температуры происходит разрушение цепных мономеров, за счет протекания необратимых химических реакций [13, 27].

Отличие в термических диаграммах аморфных и кристаллических термопластов показаны на рисунке 4.

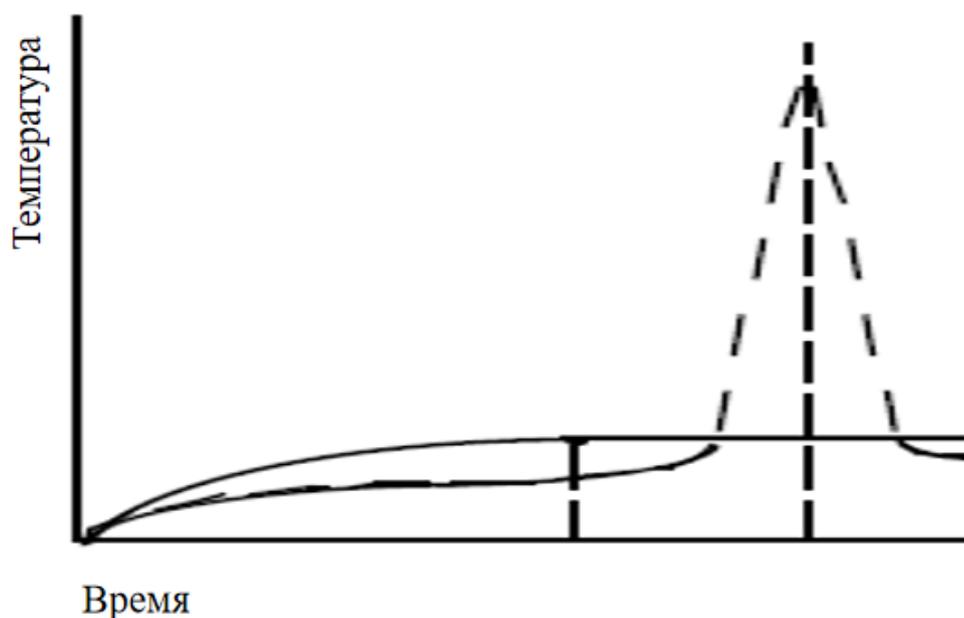


Рисунок 4 – Термические диаграммы для аморфных (сплошная линия) и кристаллических (штриховая) полимеров

1.2 Анализ существующих методов сборки пластиковых изделий

В современной промышленности процесс выпуска любых изделий из пластика включает в себя следующие операции:

- формовка или литье на термопластавтоматах;
- подготовка перед сборкой;
- сборка субкомпонентов;
- финальная сборка изделия.

Для осуществления промежуточной сборки субкомпонентов и финальной сборки изделий из термопластичных полимерных материалов

существует несколько методов, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки (рисунок 5).

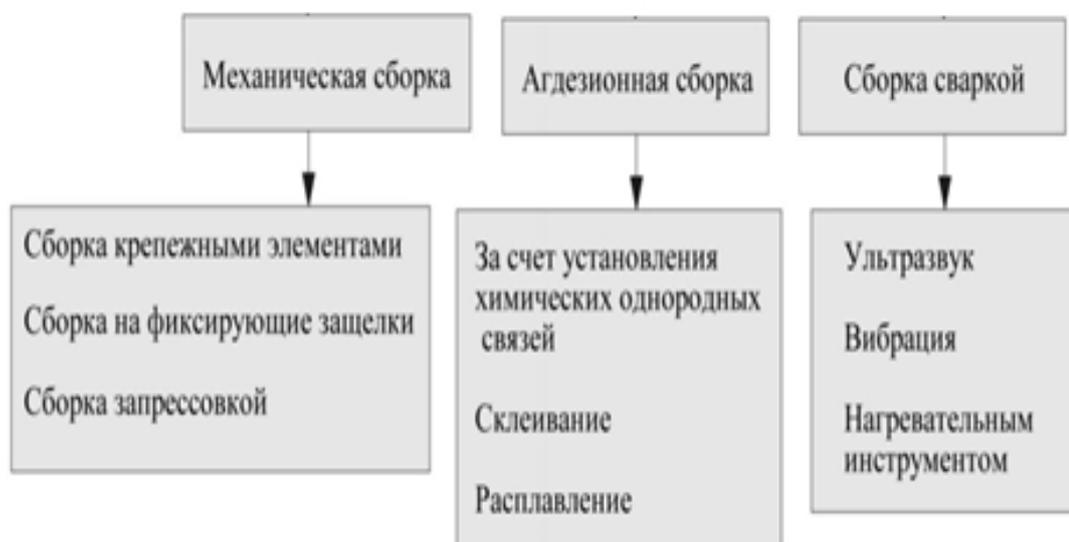


Рисунок 5 – Методы сборки пластиковых изделий

Механическая сборка является одним из самых простых и надежных способов соединения пластиковых изделий. Этот метод позволяет получать разъемное соединение, которое может быть легко демонтировано и собрано вновь.

К явным плюсам механической сборки можно отнести:

- дешевизна технологии;
- простота;
- быстрота сборки.

Не смотря на все преимущества существенным недостатком механической сборки является потеря надежности соединения со временем.

Принцип адгезионного метода соединения пластиковых изделий основывается на активации поверхностных слоев соединяемых изделий при помощи специализированных химических растворов (клеев).

Процесс адгезионной сборки начинается с зачистки поверхностей деталей и обезжиривания. После чего происходит нанесение химического раствора на кромки деталей и их соединение друг с другом. За счет протекания химических реакций в месте соединения происходит образование молекулярных связей между материалом изделий и химическим раствором.

Данный метод сборки пластиковых изделий не требует от операторов каких-либо профессиональных знаний и опыта, что делает его одним из наиболее простых способов, позволяющих получать соединения из различных материалов. К другому плюсу адгезионного метода можно отнести возможность соединения изделий, имеющих сложный профиль поверхности.

К недостаткам адгезионных видов соединения можно отнести:

- потеря времени для проведения подготовки поверхностей. Оператору необходимо механически зачистить кромки изделий, после чего их обезжирить;
- дополнительные расходы на третьи материалы. Химические клеевые растворы, применяемые в промышленности, стоят на порядок выше бытовых;
- вред для оператора (при нанесении химические растворы испаряются, что оказывает влияние на здоровье оператора сборочного участка);
- потеря прочности (со временем клеевые и эпоксидные растворы разлагаются, что приводит к ухудшению прочностных характеристик соединения, более того при динамических нагрузках клеевое соединение выступает в роли слабого сечения и может привести к разрушению) [30].

В последнее время у производителей различного рода пластиковых изделий наибольший интерес в качестве методов сборки вызывают различные типы сварки полимеров.

Известные виды сварки термопластичных полимерных материалов можно условно поделить на две большие группы: сварка с приложением давления и сварка без приложения давления (рисунок 6).



Рисунок 6 – Классификация способов сварки пластика

Сварка с приложением давления осуществляется путем нагрева соединяемых поверхностей до температуры плавления и последующего приложения давления для их соединения. К преимуществам этого метода относится высокая прочность соединения, а также возможность автоматизации процесса. Однако, этот метод имеет ряд недостатков, таких как высокая стоимость оборудования, необходимость тщательной подготовки поверхности соединяемых деталей, а также сложность регулировки режимов сварки.

Сварка без приложения давления осуществляется путем нагрева соединяемых поверхностей до температуры плавления и последующего их соединения без приложения дополнительного давления. К преимуществам этого метода относится меньшая стоимость оборудования, а также

возможность сварки изделий сложной конфигурации. Однако, этот метод имеет ряд недостатков, таких как низкая прочность соединения, а также необходимость тщательной подготовки поверхности соединяемых деталей.

К одному из видов сварки полимерных термопластичных материалов с приложением давления относится сварка нагретым инструментом. При данном способе нагрев соединяемых кромок изделия до температуры жидкотекучего состояния происходит при помощи специализированного инструмента. После чего выполняется сближение двух деталей и их пластическая деформация при помощи зажимов (рисунок 7).

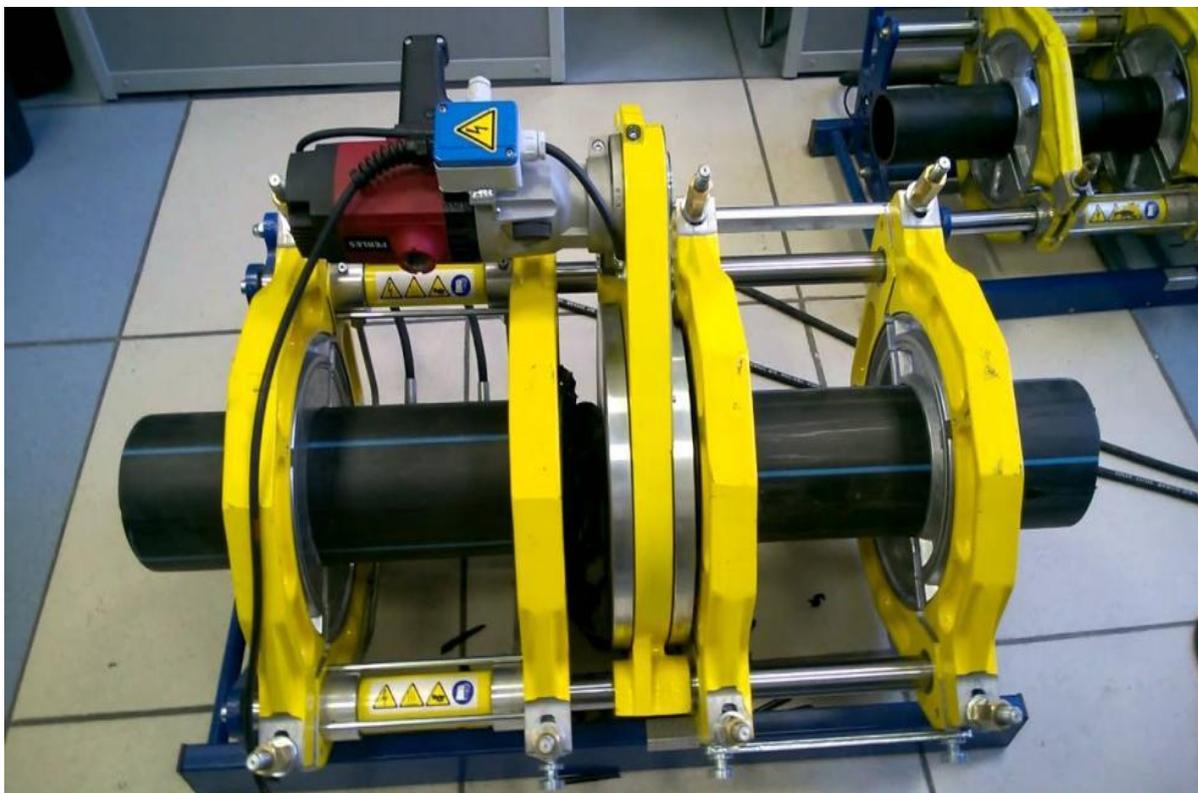


Рисунок 7 – Установка для сварки пластиковых труб

Явными преимуществами данного метода являются простота и высокая скорость получения качественного соединения.

Однако, одним из недостатков данного метода является подготовка поверхности соединяемых деталей, которая может занимать втрое больше

времени чем сам процесс сварки, так как кромки свариваемых деталей изначально механически зачищают при помощи специализированных инструментов, а потом обезжиривают [24].

Другим методом сборки изделий из полимерных материалов является сварка нагретым газом или воздухом (рисунок 8).



Рисунок 8 – Сварка нагретым газом

Особенностью данного вида сварки является метод передачи тепловой энергии к кромкам соединяемых материалов за счет разогретого до высоких температур газа или воздуха. Благодаря этому происходит оплавление поверхностных слоев деталей, материал переходит в жидкотекучие состояние и диффундирует друг в друга за счет приложения давления от

специализированного резинового валика, которым оператор прокатывает сварной шов.

Сварка нагретым газом широко применяется для соединения длинномерных тонкостенных полимерных материалов [25].

Экструзионный метод сварки относится к видам без приложения дополнительного сварочного усилия (рисунок 9).



Рисунок 9 – Ручная сварка экструдером

Ручная сварка термопластичных материалов при помощи экструдера широко применяется для получения длинномерных швов листовых конструкций с толщиной стенки от одного миллиметра.

Первым этапом экструзионной сварки является подготовка поверхности, которая заключается в разделки кромок свариваемых листов, с

целью обеспечения проплавления на всю их толщину. В качестве сварочного аппарата используется специализированный прибор – экструдер, который за счет формы своей насадки оплавляет не только кромки свариваемых листов, но и осуществляет расплавление присадочного прутка.

Ультразвуковая сварка осуществляется путем нагрева соединяемых поверхностей за счет вибраций высокой частоты. Этот метод широко применяется для сварки изделий сложной конфигурации, а также для сварки тонкостенных изделий.

Помимо этого метод ультразвуковой сварки обладает рядом существенных преимуществ:

- цикл сварки варьируется от 0.1 до 5 секунд в зависимости от толщины, формы и вида термопластичного полимерного материала, из которого изготовлено изделие;
- высокая прочность получаемого сварного шва, которая может достигать до 90 % прочности материала;
- отсутствие влияния загрязнений на прочностные характеристики получаемого соединения;
- локальный нагрев, что исключает возможность перегреть изделие;
- полная автоматизация процесса и возможность встраивания его аппаратного оснащения в технологические линии.

Не смотря на явные преимущества относительно других методов сварки пластиковых изделий и видов их сборки, ультразвуковая сварка имеет два недостатка:

- малое количество специалистов в области ультразвуковой сварки как на производственных предприятиях, так и в области науки;
- не целесообразность использования данного метода при получении длинномерных швов полимерных термопластичных материалов толщиной более 0.5 миллиметра [12].

1.3 Принцип и физические основы ультразвуковой сварки

Основным принципом ультразвуковой сварки является преобразование высокочастотных механических колебаний в тепловую энергию в зоне контакта свариваемых деталей (рисунок 10).

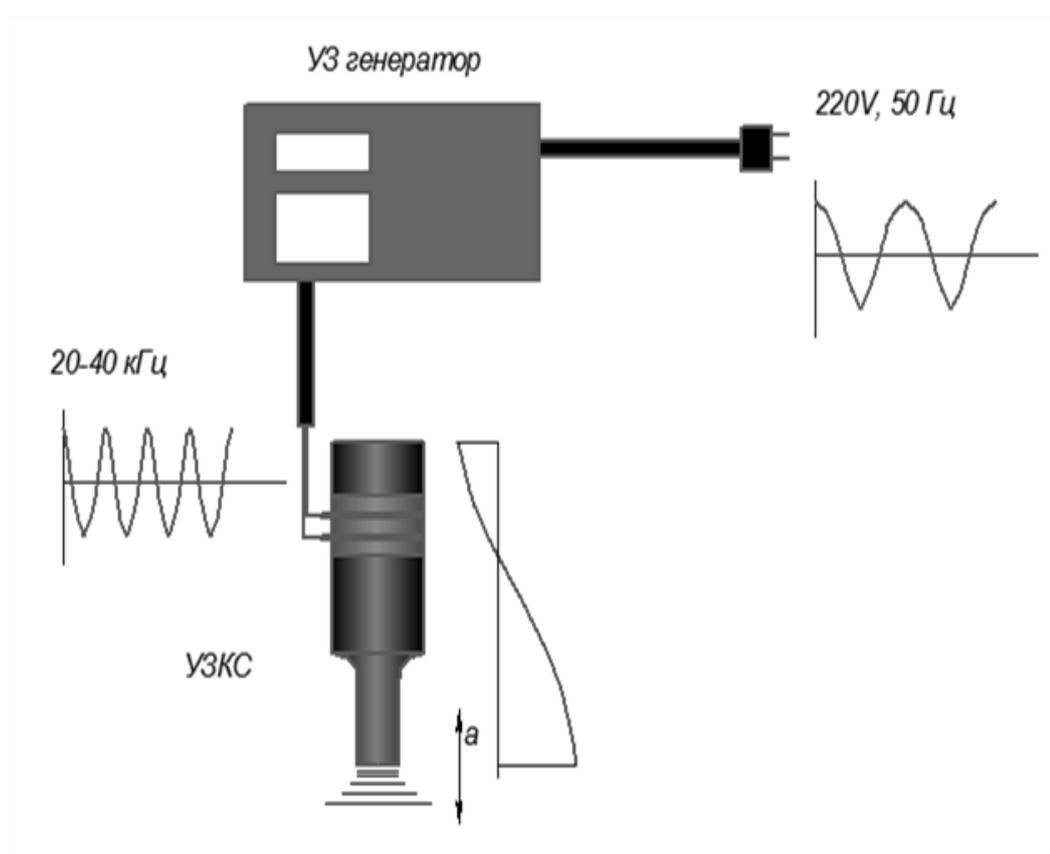


Рисунок 10 – Схема ультразвуковых сварочных комплексов

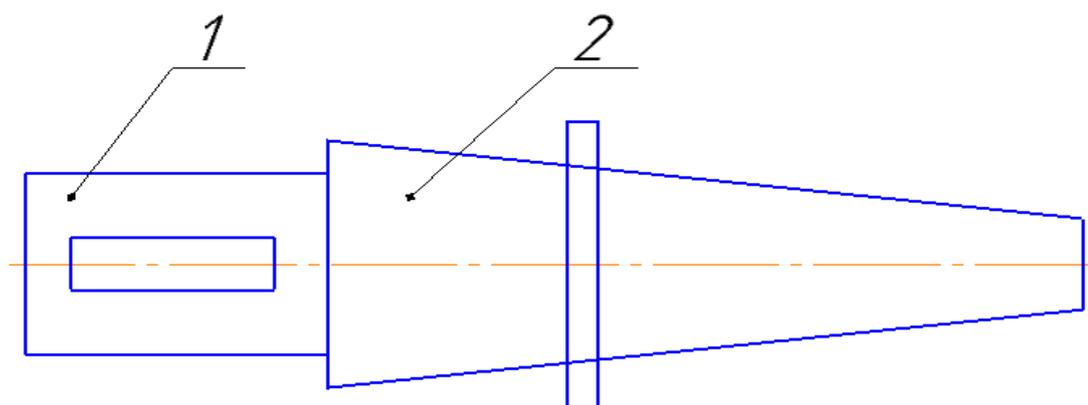
Преобразование энергии достигается за счет явления внутреннего трения между молекулами материала под действием ультразвуковых колебаний. При этом происходит локальное нагревание материала в зоне контакта, что приводит к его плавлению и образованию сварного соединения.

Для осуществления преобразования электрической энергии в механические колебания, а затем в тепловую энергию используются специализированные сварочные комплексы.

Типовые сварочные комплексы состоят из:

- ультразвукового генератора. Главная задача которого сгенерировать ток высокой частоты. Также генератор выполняет сканирование ультразвуковой колебательной системы и поиск ее собственной резонансной частоты. После входа в резонанс генератор осуществляет поддержание частоты и контроль электрических составляющих параметра режима сварки;
- ультразвуковой колебательной системы, которая преобразует электрические колебания в механические и передает их в зону сварки.

В качестве ультразвуковых колебательных систем для сварки термопластичных полимерных материалов используются системы, которые оснащены либо магнестрикционным преобразователем ультразвука (рисунок 11), либо пьезокерамическими шайбами.



1 – магнестрикционный преобразователь, 2 – ультразвуковой волновод

Рисунок 11 – Эскиз магнестрикционной системы

Магнестрикционный преобразователь (магнестриктор) выполнен в виде трансформатора и служит для преобразования колебаний тока в собственные гармонические колебания.

В таких колебательных системах зачастую волновод осуществляет функцию и увеличения значения собственной амплитуды рабочего торца

магнестриктора и для передачи создаваемых колебаний к свариваемым поверхностям, с дальнейшим формированием профиля сварной точки.

На рисунке 12 представлено фото ультразвуковой колебательной системы с магнестрикционным преобразователем.



Рисунок 12 – Ультразвуковая колебательная система в сборе

В пьезокерамических колебательных системах (рисунок 13) в качестве преобразователя электрических колебаний применяются пьезокерамические шайбы 2, которые притягиваются болтом с помощью отражателя 1 к переходнику 3. При пропускании переменного высокочастотного тока через электроды пьезокерамических шайб, они начинают изменять свои

геометрические размеры в ультразвуковом диапазоне. Затем колебания передаются на усилитель 4.

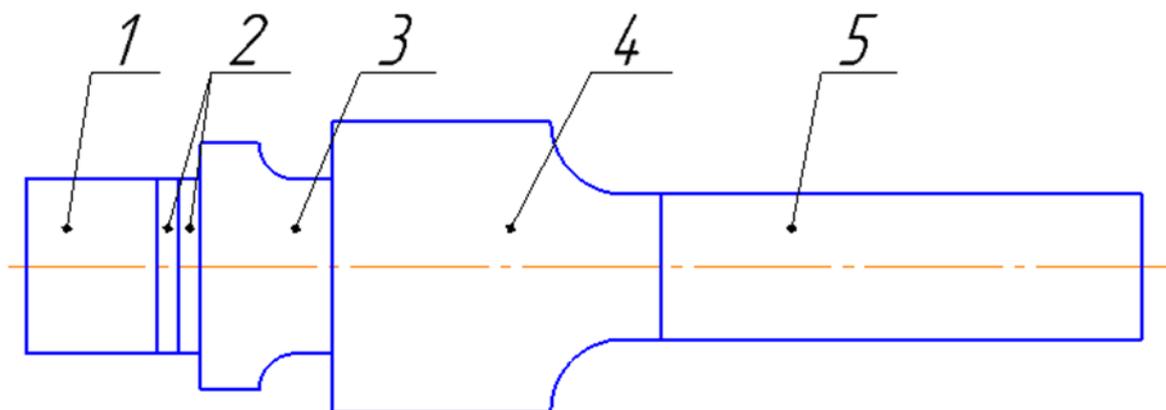


Рисунок 13 – Пьезокерамическая колебательная система

Таким образом физический принцип работы всех ультразвуковых сварочных комплексов заключается в генерации высокочастотных электрических колебаний ультразвуковым генератором, с дальнейшей их передачей на преобразователь, который переводит колебания в механические и сообщает их в свариваемые материалы.

Процесс ультразвуковой сварки начинается с установки свариваемых деталей в ложемент. Затем к месту сварки подводится ультразвуковая колебательная система, генерируются ультразвуковые колебания с помощью преобразователя, которые передаются на соединяемые детали через волновод.

На третьем этапе происходит плавление материала в зоне контакта и образование сварного соединения. Затем осуществляется выдержка для охлаждения сварного соединения и отвод ультразвуковой колебательной системы.

На рисунке 14 представлена схема цикла ультразвуковой контактной точечной сварки.

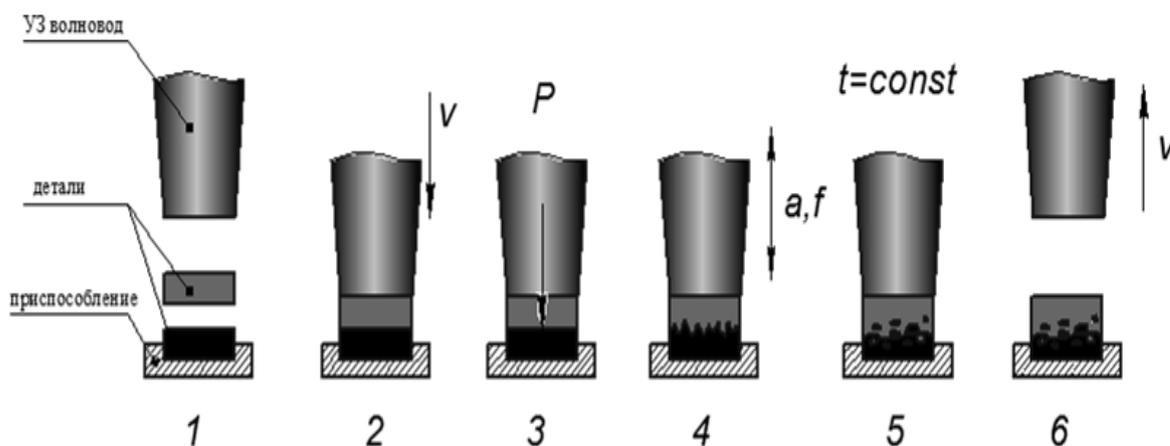


Рисунок 14 – Цикл ультразвуковой сварки

Эффективность процесса ультразвуковой сварки зависит от нескольких факторов, таких как частота, амплитуда колебаний, время сварки, сварочного усилия и свойств свариваемых материалов.

Частота ультразвуковых колебаний является одним из основных параметров, влияющих на процесс сварки. Она определяет скорость колебаний молекул материала, а, следовательно, и величину генерируемого тепла.

Как правило, для ультразвуковой сварки используются частоты от 20 до 40 кГц.

Амплитуда ультразвуковых колебаний также является важным параметром, влияющим на процесс. Она определяет величину смещения молекул материала и, следовательно, величину генерируемого тепла. Как правило, для ультразвуковой сварки используются амплитуды от 10 до 50 мкм.

Время определяет длительность воздействия ультразвуковых колебаний на свариваемые детали и величину генерируемого тепла.

Сварочное усилие определяет степень контакта между двумя соединяемыми деталями во время сварки, что оказывает влияние на эффективность прохождения волн ультразвука в полимерных

термопластичных материалах. В промышленности для ультразвуковой сварки значения сварочного усилия могут варьироваться от 0.1 до 1 МПа.

Для производства изделий из полимерных материалов применяют два основных вида ультразвуковой сварки: точечная и шовная.

Точечная ультразвуковая сварка используется для соединения двух или более пластов деталей, выполненных из пластика, друг с другом за счет формирования сварной точки в зоне контакта рабочего торца волновода с материалом. В данном случае детали должны быть жестко закреплены в ложементе прижимами, а волновод подводится к месту сварки в автоматическом режиме или вручную.

При шовной ультразвуковой сварки наоборот волновод и колебательная система жестко закреплены в специализированной оснастке, а свариваемые материалы протягиваются через зазор между рабочим торцом волновода и прижимом, выполненным в виде диска или валика.

Другая классификация видов ультразвуковой сварки описывает способ подвода энергии ультразвука к торцам свариваемых деталей, а также распределение тепловой энергии, которая расходуется на нагрев, в границе раздела. В данном случае выделяют контактную и передаточную ультразвуковую сварку.

Контактная сварка характеризуется локализацией всей энергии и колебаний в зоне контакта рабочего торца волновода с полимерным термопластичным материалом.

Контактную ультразвуковую сварку можно разделить на два вида (рисунок 15), а именно на сварку в близком и дальнем полях.

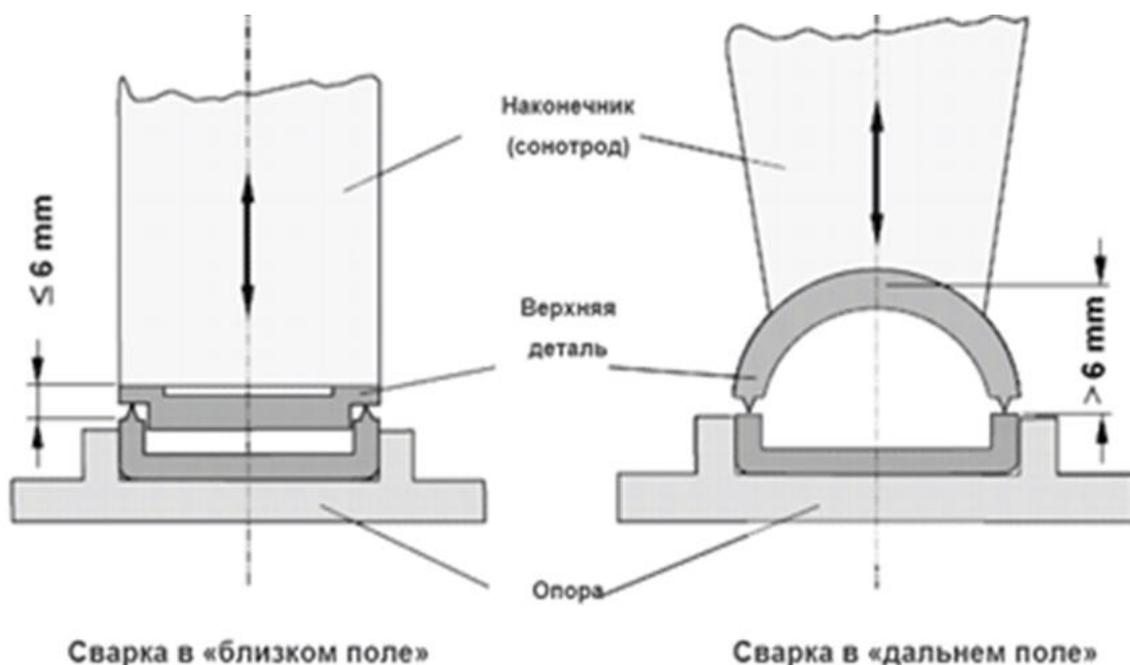


Рисунок 15 – Схемы контактной ультразвуковой сварки

Таким образом сварки отлично соединяются полимерные материалы, которые имеют модуль упругости более 100 МПа и коэффициент затухания стоячих волн в нем менее 55 м^{-1} . При этом приложение акустической энергии и колебаний возможно на поверхности одной из свариваемых деталей.

При передаточной ультразвуковой сварки энергия проходит от волновода через толщину полимерного материала и локализуется лишь в границе раздела между свариваемыми деталями. Зачастую для данного способа сварки используют специализированные энергетические концентраторы, которые и обеспечивают локализацию энергии колебаний в зазоре.

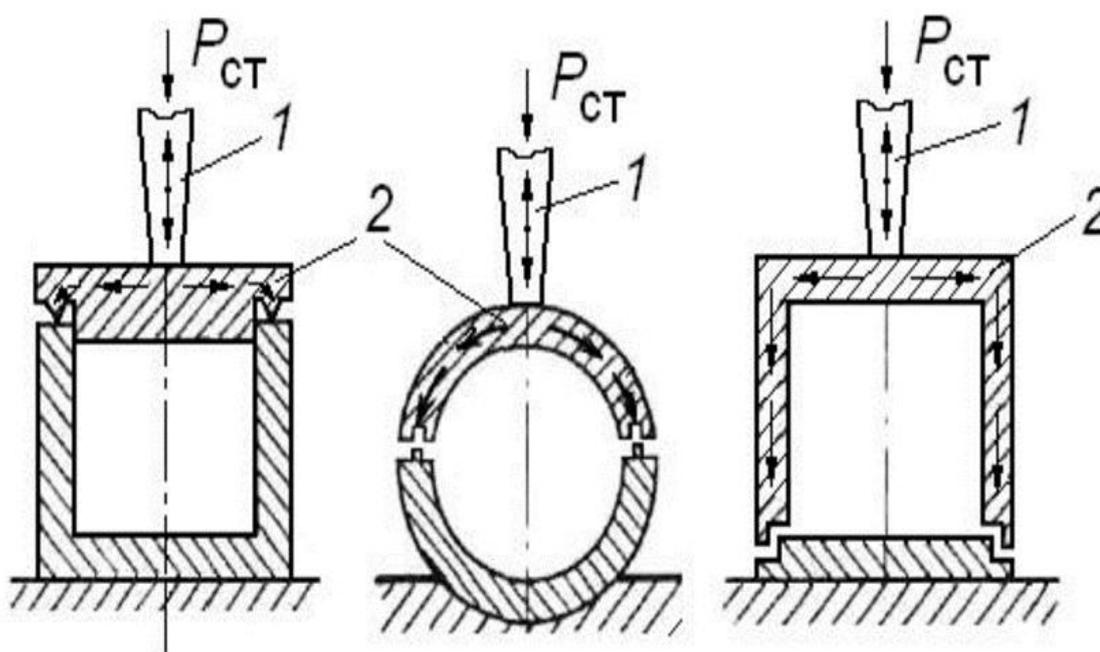
Выбор способа подвода энергии при ультразвуковой сварки изделий из термопластичных полимерных материалов обуславливается значениями модуля упругости и коэффициентом затухания волны материала.

Если свариваемый пластик имеет модуль упругости меньше 100 МПа и коэффициент затухания стоячих волн в нем больше 55 м^{-1} , то процесс

ультразвуковой сварки произойдет только на небольшом расстоянии от торца приложения колебаний ультразвука.

Не мало важным фактором при процессе ультразвуковой сварки является распределение энергии высокочастотных колебаний по поверхности контакта в зоне сварки. Для этого необходимо обеспечить условие соответствия геометрических размеров (площадь и форма) рабочего торца волновода с требуемой геометрией сварной точки на соединяемых пластиковых изделиях.

Для сварки изделий из жестких видов термопластичных полимеров в промышленности используется передаточный тип ультразвуковой сварки. Технологические схемы которого представлены на рисунке 16.



1 – волновод, 2 – деталь

Рисунок 16 – Схемы передаточной ультразвуковой сварки

Так как жесткие термопластичные полимерные материалы обладают отличными свойствами с точки зрения акустики, то вся акустическая энергия

ультразвуковых волн, передаваемая от рабочего торца волновода на поверхность верхней детали, проходит к границе раздела между деталями лишь незначительно ослабляясь.

При передаточной ультразвуковой сварки на концентрацию тепловой энергии в зоне перевода пластика в жидкотекучее состояние для формирования сварного соединения влияют не только параметры режима процесса, а также рельеф кромок деталей [20, 15].

В таблице 1 приведены данные, показывающие качественную оценку прочностных характеристик соединений из различных термопластичных полимерных материалов, применяемых в промышленности, после ультразвуковой сварки [31, 23].

Таблица 1 – Характеристика соединений при ультразвуковой сварки

Материал	Качество соединений при:	
	контактной сварки	передаточной сварки
Полистирол	Очень высокое	Очень высокое
АБС - пластик	Очень высокое	Высокое
Сополимер стирола с акрилонитрилом	Очень высокое	Очень высокое
Полиметилметакрилат	Очень высокое	Очень высокое
Поликарбонат	Очень высокое	Очень высокое
Полиамид	Высокое	Удовлетворительное
Полиэфир	Очень высокое	Удовлетворительное
Поливинилхлорид: непластифицированный пластифицированный	Очень высокое Высокое	Высокое Неудовлетворительное
Полиэтилен	Очень высокое	Неудовлетворительное
Полипропилен	Очень высокое	Неудовлетворительное

Из таблицы видно, что многие термопластичные полимеры имеют очень высокие показатели прочностных характеристик соединения только при контактной ультразвуковой сварки.

Только жесткие виды термопластичных полимеров, такие как полистирол, АБС-пластик, поликарбонат и другие показывают высокие прочностные характеристики при передаточной ультразвуковой сварки.

Мягкие виды термопластичных полимеров, такие как полиамид, полипропилен, полиэтилен и другие напротив обладают наихудшими прочностными характеристиками соединения при передаточной ультразвуковой сварки [23].

1.4 Обзор технических решений в области ультразвуковой сварки

К лидерам по производству ультразвукового сварочного оборудования относятся несколько компаний: «Dukane», «Branson», «Ультрарезонанс» и «U-Sonic».

Данные предприятия активно занимаются разработкой принципиально новых видов ультразвукового сварочного оборудования.

Например, компания «Ультрарезонанс» в 2024 году представила концепт многоточечной ультразвуковой машины (рисунок 17).

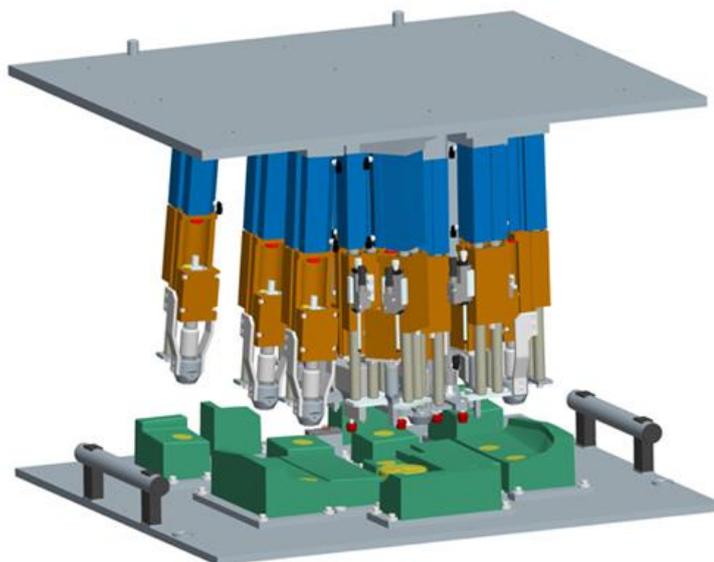
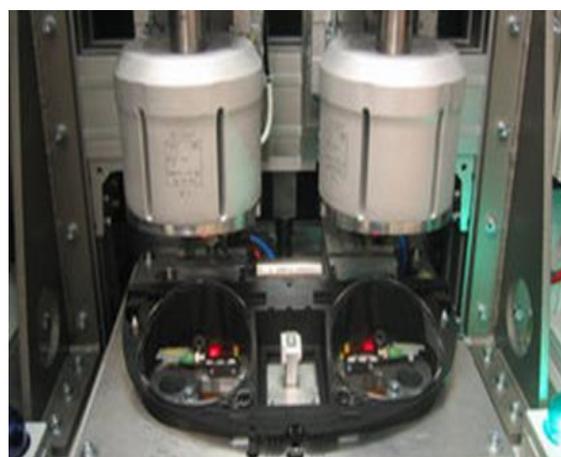


Рисунок 17 – Схема рабочей зоны многоточечной машины
Разработкой многоточечных сварочных машин различных типов, конфигураций и для сварки различного рода деталей из термопластичных

полимерных материалов (рисунок 18) компания занимается более пятнадцати лет [28].



а



б



в

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

Рисунок 18 – Рабочие зоны многоточечных машин, разработанных «Ультрарезонанс»

Из зарубежных фирм можно выделить немецкую компания «Dukane», которая в своем портфеле имеет линейку ультразвукового сварочного оборудования различной степени автоматизации.

На рисунке 19 представлен один из комплексов, разработанных данной компанией.



Рисунок 19 – Комплекс для ручной точечной сварки компании «Dukane»

На рисунке 20 продемонстрирован более производительный вариант ультразвукового сварочного оборудования – полуавтоматический стенд [26].



Рисунок 20 – Сварочный стенд компании «Dukane»

В 2020 году отечественной компанией «U-Sonic» была создана ультразвуковая многопостовая сварочная машина (рисунок 21). Данное

оборудование предназначено не только для процесса ультразвуковой сварки, но и способно одновременно осуществлять ультразвуковую пробивку отверстия и наносить теснение с использованием энергии высокочастотных колебаний.



Рисунок 21 – Многоточечная машина для ультразвуковой сварки компании «U-Sonic»

Главной особенностью данной машины является то, что каркас детали укладывается оператором в ложемент, а привариваемые элемент сразу фиксируются в специализированных пазах на волноводах ультразвуковых колебательных систем. Перемещение сварочных головок к месту сварки осуществляется за счет электроприводов, что позволяет повысить контролируемость процесса сварки [29].

1.5 Ультразвуковая сварка изделий из армированных стекловолокном полимеров

В последнее время проводилось множество исследований, направленных на изучение физических основ ультразвуковой сварки полимеров, оптимизацию параметров сварки и поиск новых областей применения этого метода.

Одним из важных направлений исследований в области ультразвуковой сварки полимеров является изучение влияния параметров сварки на качество соединения.

В работе [2] было показано, что оптимальные значения мощности и времени ультразвуковой сварки зависят от толщины свариваемых изделий и вида полимера. Кроме того, авторы установили, что наилучшие результаты сварки достигаются при использовании режима импульсной сварки.

В другом исследовании [4] было показано, что качество сварного соединения зависит от величины давления, приложенного к свариваемым изделиям, а оптимальное значение давления зависит от вида полимера.

Еще одним важным направлением исследований является изучение взаимодействия ультразвука с различными видами полимеров.

В работе [1] было показано, что ультразвук способствует повышению прочности сварного соединения при сварке полиэтилена высокой плотности за счет увеличения степени кристалличности в зоне сварки.

В другом исследовании [3] было показано, что ультразвук может быть эффективно использован для сварки полипропилена, при этом наилучшие результаты достигаются при использовании режима импульсной сварки.

В последнее время особое внимание уделяется разработке новых методов ультразвуковой сварки, позволяющих сваривать изделия сложной формы и из различных видов полимеров.

В работе [5] был предложен новый метод ультразвуковой сварки, основанный на использовании вибрирующего зонда, который позволяет сваривать изделия из термопластичных полимеров сложной формы.

В другом исследовании [9] был разработан новый метод ультразвуковой сварки, основанный на использовании микроволнового излучения, который позволяет сваривать изделия из различных видов полимеров, включая термопласты и эластомеры.

В исследовании [7] была изучена микроструктура соединения, полученного после ультразвуковой сварки, из армированного стекловолокном термопластичного композита. При анализе наблюдалось только межфазное разрушение матрицы, поскольку в основном это было залечивание межфазной границы полимер-полимер под сварным швом (рисунок 22а). При продолжении сварки большое количество волокон перемещается в зону сварного шва, что приводит к появлению большого количества выдергивающихся волокон (рисунок 22б).

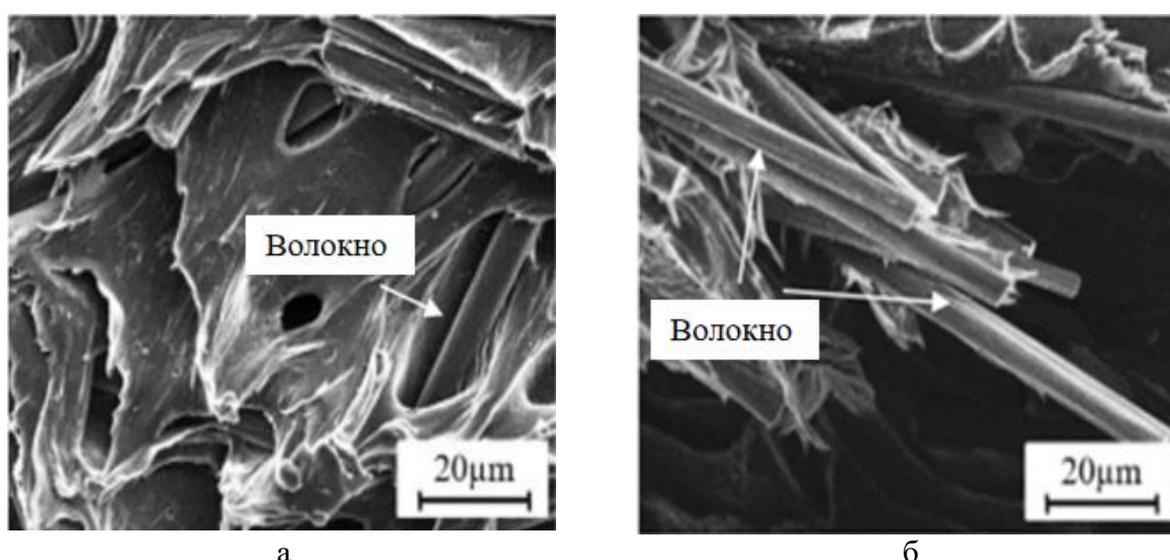


Рисунок 22 – Микроструктура сварного соединения

Однако при чрезмерной сварке некоторые полимерные цепи разлагаются до газов, что приводит к большой пористости сварного соединения (рисунок 23).

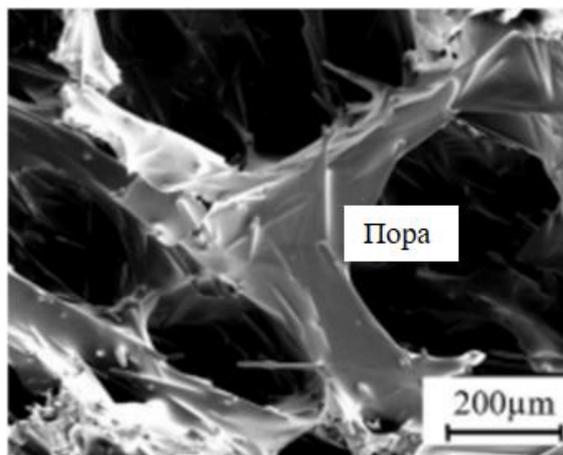


Рисунок 23 – Поры в сварном соединении

Авторы работы [8] также исследовали микроструктуру поперечного сечения сварного шва после ультразвуковой точечной сварки композитов, армированных стекловолокном, при различных энергиях сварки.

При низкой энергии (рисунок 24) возникает непровар. В зоне сварного шва преобладает только расплавленный полимер, волокна практически не наблюдаются.

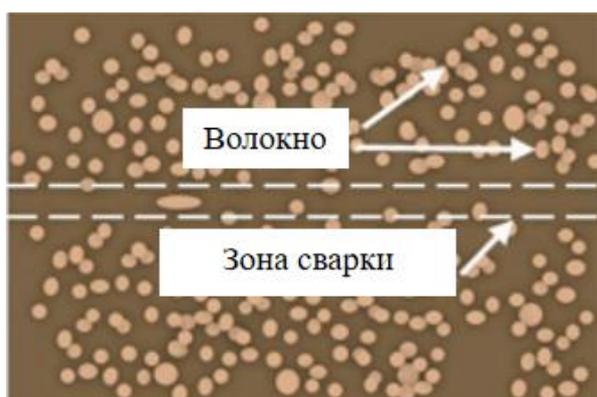


Рисунок 24 – Схема непровар при ультразвуковой сварки

С увеличением энергии (рисунок 25) область сварного шва увеличивается, в шов начинает хаотично попадать больше волокон при движении полимерных цепей.

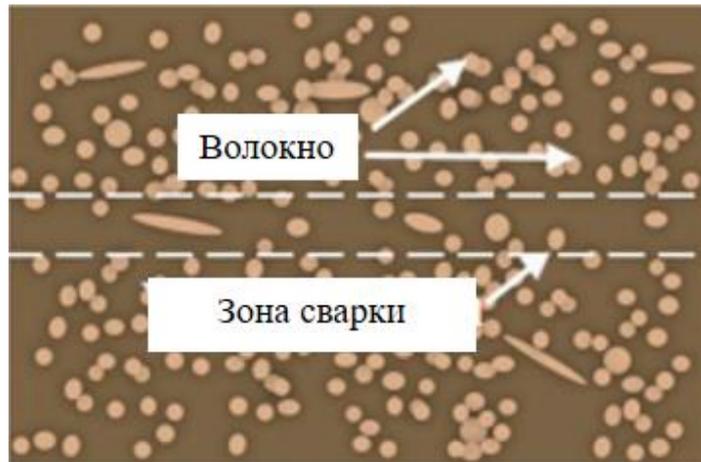


Рисунок 25 – Схема шва после ультразвуковой сварки

Когда в соединение вводится слишком большое количество энергии (рисунок 26), образуются поры, которые нарушают пространство полимера и волокон, что приводит к различному распределению и направлениям конфигурации волокон из исходного материала. И наоборот, волокно существенно влияет на молекулярную взаимную диффузию матрицы.

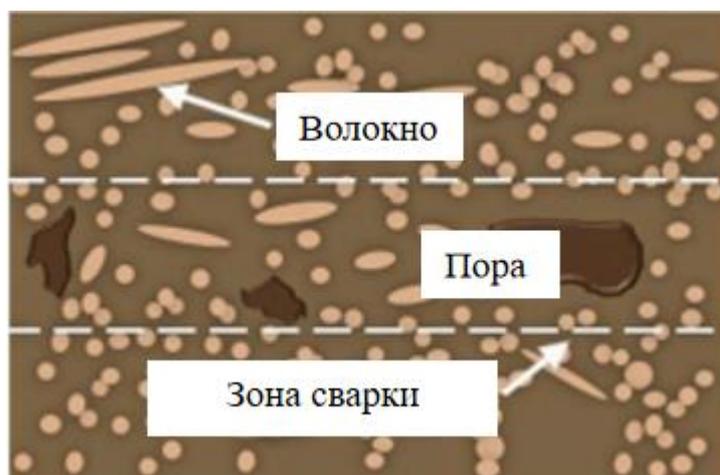


Рисунок 26 – Схема пор в сварном шве

Наличие волокон в области сварного шва уменьшает объем расплавляемой полимерной матрицы, а движение волокон будет влиять на

повторное перепутывание молекулярных цепей в полимере. Эти явления будут определять окончательную прочность сварных швов.

В работе [6] авторы увеличили прочность сварного шва полимерных композитов, армированных стекловолокном, за счет контроля морфологических параметров, таких как увеличение степени кристалличности и соотношения кристаллических фаз.

Таким образом, молекулярная структура на границе раздела термопластичных полимеров, армированных стекловолокном, отличается от структуры чистых полимеров, а высокочастотные колебания приводят к сложной эволюции волокон внутри цепей свободной матрицы и их взаимодействию с основной матрицей.

Исходя из проведенного анализа, можно сделать вывод, что в исследованиях в области ультразвуковой сварки огромное внимание уделяется влиянию различных параметров режима и свойств материала на прочностные характеристики сварного соединения.

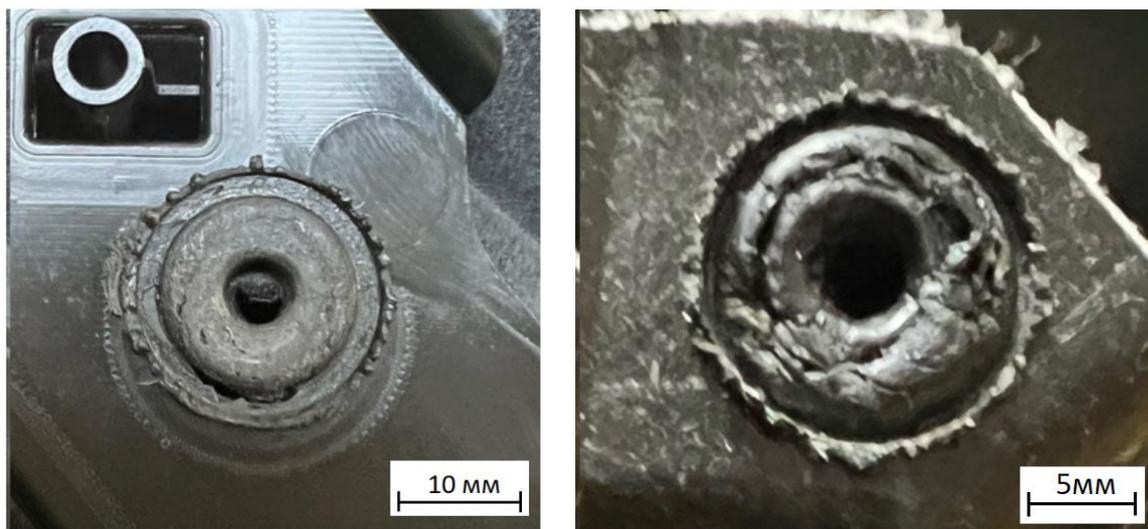
Однако при ультразвуковой сварке новых видов полимеров, например, армированных стекловолокном, возникает повышенный износ торцов волноводов (рисунок 27).



Рисунок 27 – Торец изношенного волновода

Образующиеся на торце волновода впадины приводят к неправильному формированию сварной точки и ухудшению прочностных характеристик соединения (рисунок 28).

И даже небольшой износ рабочего торца волновода приводит к нарушению геометрии сварной точки, что оказывает влияние на стабильность качества получаемых соединений.



а

б



в

а – требуемая сварная точка, б, в – брак сварной точки

Рисунок 28 – Примеры брака сварных точек

Выводы:

В современной промышленности все активнее начинают применять термопластичные композитные полимерные материалы, так как их физико-механические и эксплуатационные свойства близки к металлам.

Однако, при использовании таких материалов для изготовления различных изделий необходимо внедрение и новых методов их сборки. Ультразвуковая сварка на сегодняшний день является одним из наилучших способов соединения подобного рода изделий. Так как при ней нет расходов на закупку дополнительных материалов (клеи и метизы), процесс не требует подготовки поверхности (зачистка кромок и обезжиривание), более того она может быть полностью автоматизирована, что существенно сокращает затраты производства и повышает стабильность качества.

В современных научных исследованиях практически все авторы делают акцент на исследование влияния различных параметров режима процесса ультразвуковой сварки на прочностные и эстетические характеристики получаемого соединения. Однако, армирование полимеров различного рода волокнами приводит к повышению их прочностных характеристик, что приводит к износу рабочих торцов ультразвуковых волноводов. Вследствие чего нарушается геометрия сварной точки и ухудшается стабильность получения качественного соединения. Данный аспект в литературе практически не освещен.

2 Разработка методики и оборудования для проведения исследований

2.1 Описание объекта исследований

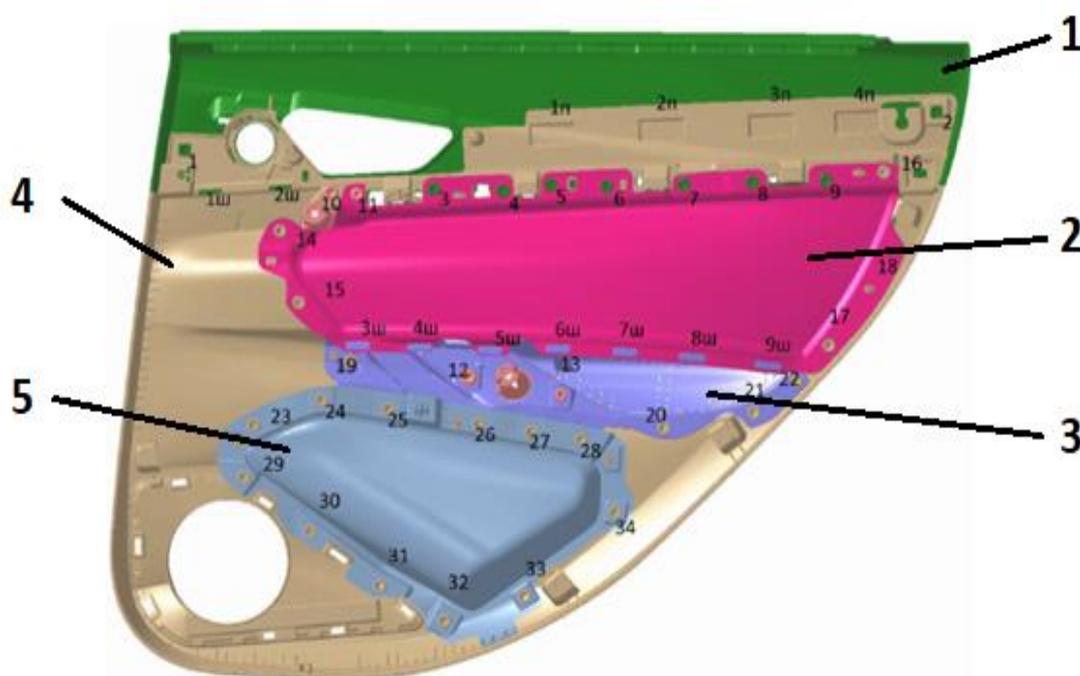
Для проведения исследований по влиянию различных покрытий на износостойкость волноводов при ультразвуковой сварки армированных стекловолокном полимерных материалов была выбрана дверная карта автомобиля LADA Vesta, представленная на рисунке 29.



Рисунок 29 – Дверная карта автомобиля LADA Vesta

Дверная карта состоит из нескольких элементов (рисунок 30):

- подоконная накладка;
- вставка дверная;
- накладка ручки;
- корпус двери;
- карман.



1 – подоконная накладка, 2 – вставка дверная, 3 – накладка ручки, 4 – корпус двери, 5 – карман

Рисунок 30 – Схема элементов дверной карты LADA Vesta

Технологический процесс финальной сборки дверной карты автомобиля LADA Vesta начинается со сборки всех компонентов на сборочном стенде, который оборудован ложементом, повторяющим геометрию лицевой части изделия.

Оператор укладывает подоконную накладку и ручку, после чего осуществляет установку основания двери и вставку накладки ручки. Завершающим этапом сборки является установка кармана и вставки.

На рисунке 31 представлено фото стенда для сборки всех четырех дверных карт автомобиля LADA Vesta.



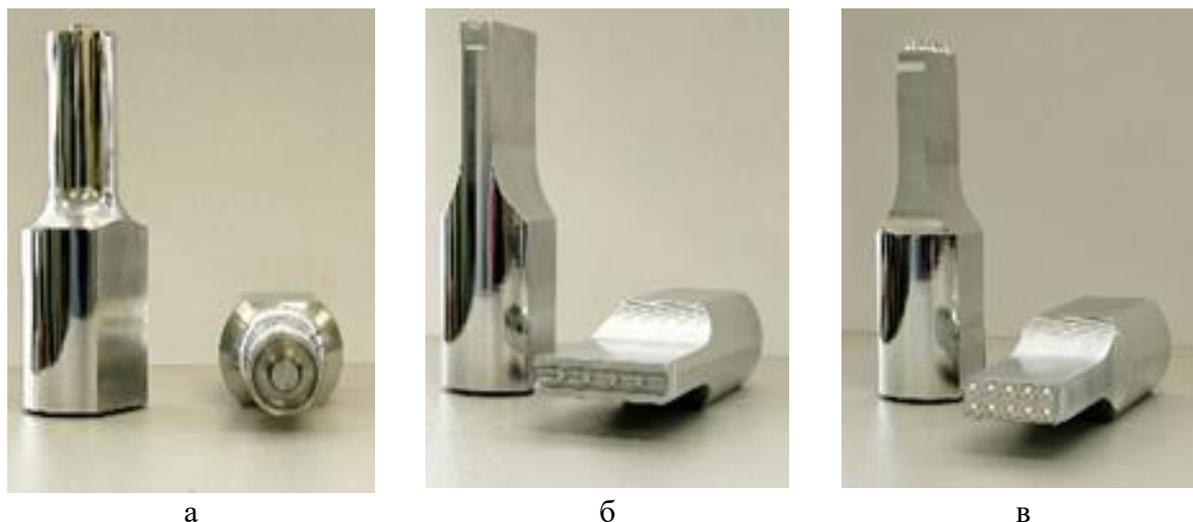
Рисунок 31 – Сборочный стенд дверных карт LADA Vesta

После сборки деталь загружается в автоматизированную многоточечную линию ультразвуковой сварки, которая осуществляет сварку 52 точек по четырем группам.

Машина оснащена волноводами трех типов:

- волновод с цилиндрическими шипами;
- волновод с канавкой;
- волновод круглый.

Данные волноводы (рисунок 32) изготавливаются из алюминиевого сплава Д16Т.



а – волновод круглый, б – волновод с канавкой, в – волновод с шипами

Рисунок 32 – Фото волновод для сварки дверной карты

Подоконная накладка дверной карты выполнена из термопластичного полимерного материала марки Softell TKG 300N C13034, имеющего матрицу в виде полипропилена и армированного 25 процентами стекловолокна.

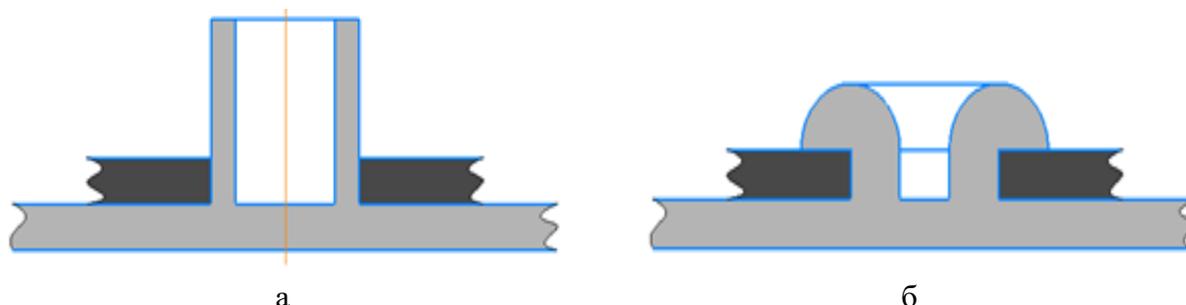
Данный материал широко применяется в автомобильной промышленности и имеет следующие эксплуатационные характеристики:

- легкий глянец;
- устойчивость к царапинам;
- мягкие тактильные ощущения.

Подоконная накладка соединяется с корпусом двери при помощи оплавления направляющих цилиндрических пинов. Именно при их

ультразвуковой сварке возникает повышенный износ рабочих торцов волновод.

На рисунке 33 представлена схема получаемой сварной точки.



а – до ультразвуковой сварки, б – после ультразвуковой сварки

Рисунок 33 – Схема сварной точки

Механические и физические свойства Softell TKG 300N C13034 приведены в таблице 2 [21].

Таблица 2 – Свойства Softell TKG 300N C13034

Параметры	Значения
Скорость течения расплава (230 °С/2.16 кг)	6 г/10 мин
Плотность (23 °С)	1.09 г/см ³
Модуль упругости при изгибе (23 °С)	2300 МПа
Ударная вязкость по Шарпи с надрезом (23 °С)	30 кДж/м ²
Ударная вязкость по Шарпи с надрезом (0 °С)	20 кДж/м ²
Ударная вязкость по Шарпи с надрезом (-30 °С)	8 кДж/м ²
Температура прогиба под нагрузкой (0.45 МПа)	125 °С

2.2 Оборудование для проведения экспериментальных исследований

2.2.1 Проектирование ультразвуковой колебательной системы

Первым этапом расчета любой колебательной системы для ультразвуковой сварки является нахождение количества энергии, требуемой

для перевода полимерного материала в жидкотекучее состояние за счет акустической мощности.

Для нахождения удельной энергии, воспользуемся формулой:

$$Q = (0.8 - 1.0)c\rho T_{\text{пл}}, \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость,

ρ – плотность;

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

По данным таблице 3 Softell TKG 300N C13034 обладает плотностью $\rho=1.09$ г/см³.

Так как Softell TKG 300N – это армированный стекловолокном 25% полипропиленовый сополимер, то удельную теплоемкость и температуру плавления примем как у полипропилена.

Согласно ГОСТ 26996-86 теплоемкость сополимеров пропилена и полипропилена одинакова, и составляет $c=1.93$ Дж/г·К, а его температура плавления – 160 °С, которую нужно перевести в кельвины и тогда она составит 433 К.

Используя формулу (1) рассчитаем удельную энергию и округлим до целых значений:

$$Q = 0.9 \cdot 1.93 \cdot 1.09 \cdot 433 = 820 \text{ Дж/см}^3$$

Необходимую акустическую мощность ультразвуковой энергии, которая требуется для сварки, найдем по формуле [13]:

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

где E – модуль упругости,

ε – амплитуда деформации;

f – частота колебаний.

В расчетах ультразвуковых колебательных систем амплитуду деформации ε принимают равной 10 мкм. [23].

Модуль упругости E Softell TKG 300N C13034, согласно таблице 3, равен 2300 МПа.

Частота колебаний зависит от типа и геометрических размеров преобразователя ультразвука.

В данной работе был выбран магнитострикционный преобразователь ультразвука, имеющий квадратное сечение 26 на 26 мм и частотой колебаний f равно 30000 Гц (рисунок 34).



Рисунок 34 – Магнитостриктор сечением 26 на 26 мм

Зная параметры рассчитаем акустическую мощность по формуле (2):

$$Q_{\text{ак}} = 30000 \cdot 3.14 \cdot 2300000000 \cdot 0.00001^2 = 21.6 \text{ кДж}/(\text{мм}^3 \cdot \text{с})$$

После определения удельной энергии и акустической мощности, которые требуется для расплавления свариваемого полимерного материала,

начинается второй этап проектирования ультразвуковой колебательной системы, связанный с расчетом бустера.

Главной задачей бустера в составе колебательной системы является увеличение амплитуды колебаний, переданных от преобразователя.

Во сколько раз происходит увеличение амплитуды показывает коэффициент усиления k , который рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{D_{\text{входной}}}{D_{\text{выходной}}} \quad (3)$$

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

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

Как правило для получения продольных гармонических колебаний любой ультразвуковой колебательной системы (магнитострикционной или пьезокерамической) на стадии расчета коэффициента усиления бустера учитывается фактор соотношения его диаметров. В общем случае различия по номинальному значению диаметров должно быть не менее 30 и не более 50 процентов.

В данной работе используется магнитострикционный преобразователь ультразвука, сечение которого представляет квадрат со стороной 26 миллиметров. Для соединения с бустером преобразователь припаян к переходнику из стали, сечение которого составляет 30 миллиметров.

Учитывая эти значения примем входной диаметр бустера 42 миллиметра.

Для определения выходного диаметра бустера при начальных расчетах ультразвуковой колебательной системы коэффициент усиления выбирается из диапазона от 1.5 до 2.5.

Выберем среднее значение коэффициента усиления, которое будет равно 2.

Используя формулу (3) определим выходной диаметр бустера:

$$D_{\text{выходной}} = \frac{D_{\text{входной}}}{k} = \frac{42}{2} = 21 \text{ мм}$$

Теперь найдем резонансную длину бустера по формуле:

$$l = \frac{nc}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln k}{\pi n}\right)^2}, \quad (4)$$

где n – целое число полувольт;

c – скорость звука;

k – коэффициент усиления.

С целью рационального расхода металла рассчитаем ультразвуковую колебательную систему в которой укладывается одна полуволна, следовательно, n будет равно 1.

Скорость звука в титановых сплавах составляет 6070 м/с.

Подставим значения в формулу (4) и найдем l :

$$l = \frac{1 \cdot 6070000}{2 \cdot 30000} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln 2}{\pi \cdot 1}\right)^2} = 103.6 \text{ мм.}$$

Бустер является средним звеном ультразвуковой колебательной системы, который, как и преобразователь, относится к основным ее частям, нетребуемым замены во время процесса ультразвуковой сварки, в отличие от волноводов. Именно поэтому на бустере целесообразно изготовить борт крепления всей колебательной системы в оснастки, который должен располагаться в месте, где отсутствуют колебания в процессе сварки полимерных изделий.

Сечение ультразвуковой колебательной системы, в котором отсутствуют колебания называется нулевым сечением.

Для определения данного сечения используют формулу:

$$x_0 = \frac{l}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{\pi} \ln k \right), \quad (5)$$

где k – коэффициент усиления;

l – длина бустера;

x_0 – расстояние от входного торца, до нулевого сечения.

$$x_0 = \frac{103.6}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{\pi} \ln 2 \right) = 22.3 \text{ мм.}$$

Третий этап проектирования ультразвуковой колебательной системы связан с определением длины и выходного диаметра волновода.

Диаметр рабочего торца волновода определяется формой сварного соединения. В данном случае диаметр сварной точки должен быть 17 мм.

Используя формулы (3) и (4) найдем входной диаметр волновода и его резонансную длину.

$$D_{\text{входной}} = D_{\text{выходной}} \cdot k = 17 \cdot 1.5 = 25.5 \text{ мм}$$

$$l = \frac{1 \cdot 6070000}{2 \cdot 30000} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln 1.5}{\pi \cdot 1} \right)^2} = 102 \text{ мм.}$$

После завершения предварительного расчета длин и диаметров всех элементов ультразвуковой колебательной системы, разрабатывается ее будущий эскиз, на котором прорисовываются различные фаски, радиусы, резьбы и пазы.

Затем разрабатывается модель ультразвуковой колебательной системы для проведения модального анализа методом конечных элементов.

Один из примеров модального анализа в программе Ansys представлен на рисунке 35.

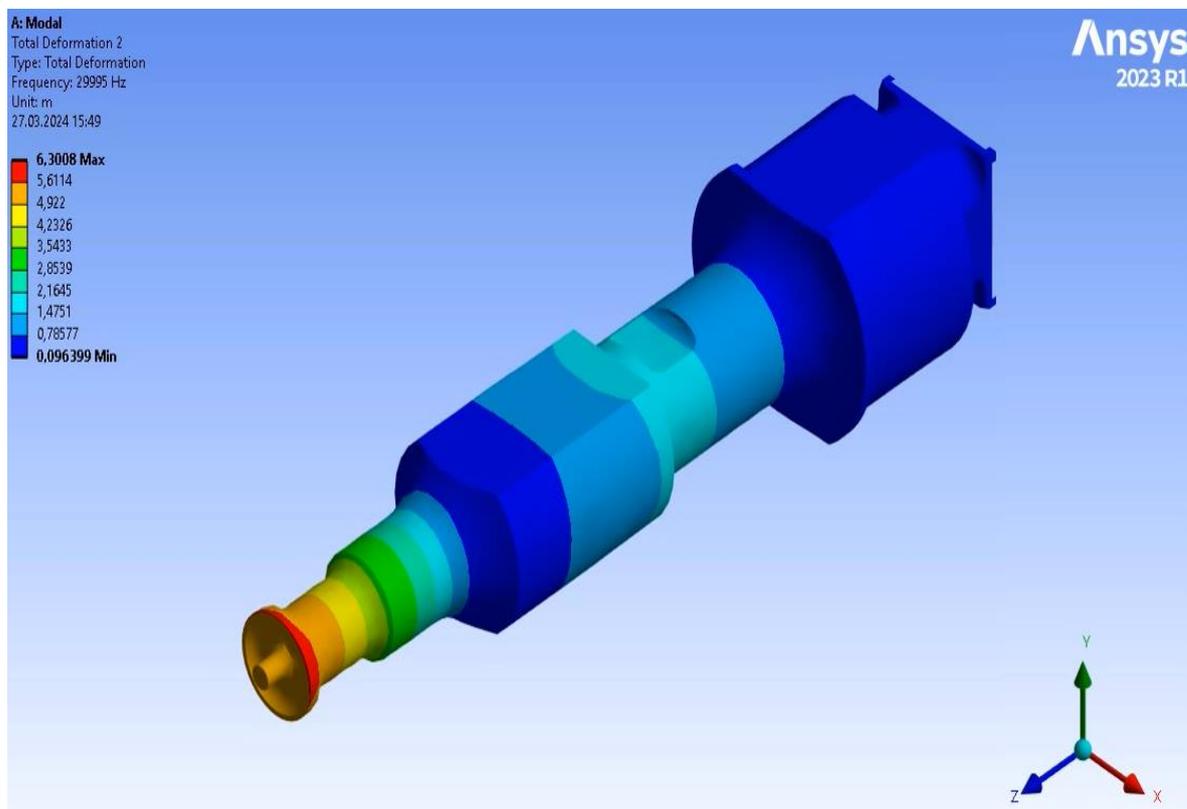


Рисунок 35 – Модальный анализ колебательной системы

По результатам модального анализа проводятся корректировки геометрических размеров элементов ультразвуковой колебательной системы, с целью достижения продольных гармоник колебаний всей системы и обеспечения пиковых значений амплитуды колебаний на рабочем торце волновода.

После завершения внесения всех изменений в модель ультразвуковой колебательной системы и финальных проверок методом конечных элементов, начинается разработка конструкторской документации, к которой относятся чертежи всех элементов колебательной системы.

Только после этого, приступают к изготовлению всех элементов колебательной системы и их сборки (рисунок 36).

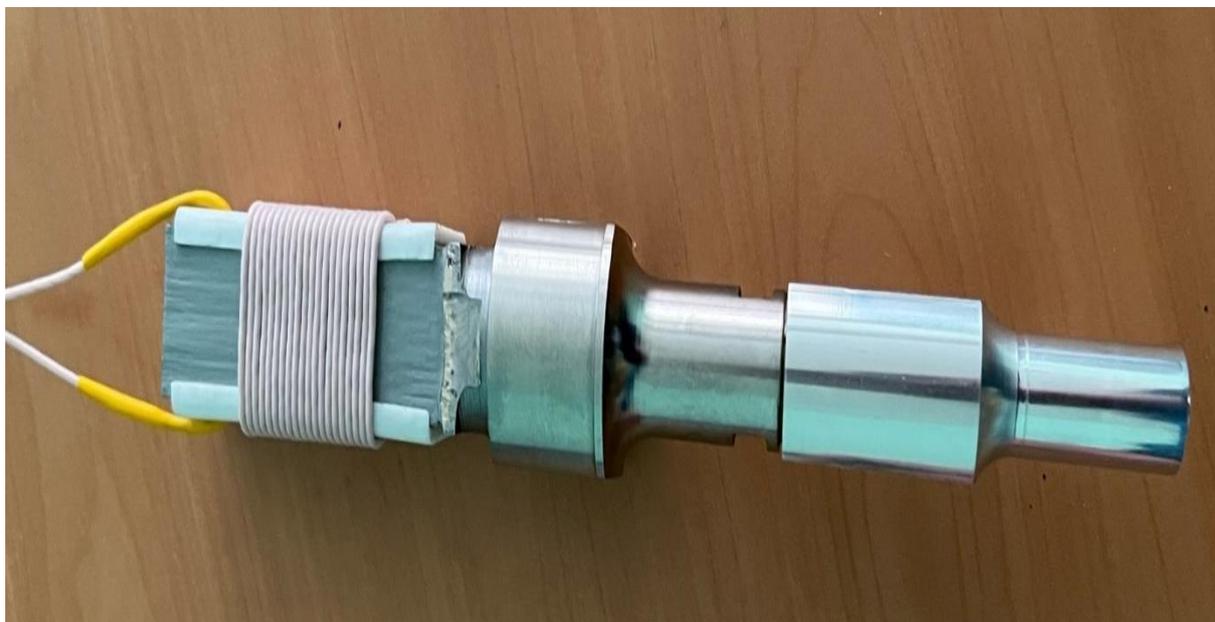


Рисунок 36 – Изготовленная ультразвуковая колебательная система

2.2.2 Описание ультразвукового генератора

Электрический генератор тока высокой частоты относится к основным элементам, входящих в состав любого ультразвукового оборудования, в том числе и сварочных комплексов.

К одной из важнейших задач генератора можно отнести согласование собственного электрического контура и электро-механического контура ультразвуковой колебательной системы. Для этого любой генератор ультразвукового оборудования имеет в своем составе целый блок, отвечающий за поиск и подстройку резонансной частоты обоих контуров.

На базе Тольяттинского государственного университета начиная с 2017 года ведутся разработки ультразвукового оборудования различной сложности и степени автоматизации.

Специалистами «Центра ультразвуковых технологий» передовой инженерной школы «Гибридные и комбинированные технологии» был разработан ультразвуковой генератор УЗГ-1/30 (рисунок 37).



Рисунок 37 – Модель ультразвукового генератора УЗГ-1/30

Данный генератор предназначен для работы с магнитострикционными колебательными системами, частота которых не более 30 кГц. Следовательно, он подходит для использования в процессе ультразвуковой сварки разработанной ультразвуковой колебательной системы.

На лицевой панели генератора находится дисплей для отображения следующих значений:

- фактической резонансной частоты;
- времени таймера;
- тока подмагничивания;
- фактического тока сдвига частоты.

2.3 Разработка методики исследования износостойкости волноводов

Целью проведения исследований являлось – определение влияния различных типов покрытий на износостойкость рабочих торцов волноводов в процессе ультразвуковой сварки.

Исследования проводили на базе производства пластиковых изделий АО «АвтоВАЗ» при автоматической ультразвуковой многоточечной сварки элементов дверной карты автомобиля LADA Vesta.

В качестве оборудования использовали генератор УЗГ-1/30 с диапазоном мощности от 0.6 до 1.5 кВт и диапазоном частоты колебаний от 16 до 35 кГц (рисунок 38):



Рисунок 38 – Фото ультразвукового генератора УЗГ 1/30

Ультразвуковую колебательную систему (рисунок 39), оснащенную излучателем в виде магнитострикционного преобразователя сечением 26 на 26 миллиметров и резонансной расчетной частотой 30 кГц.

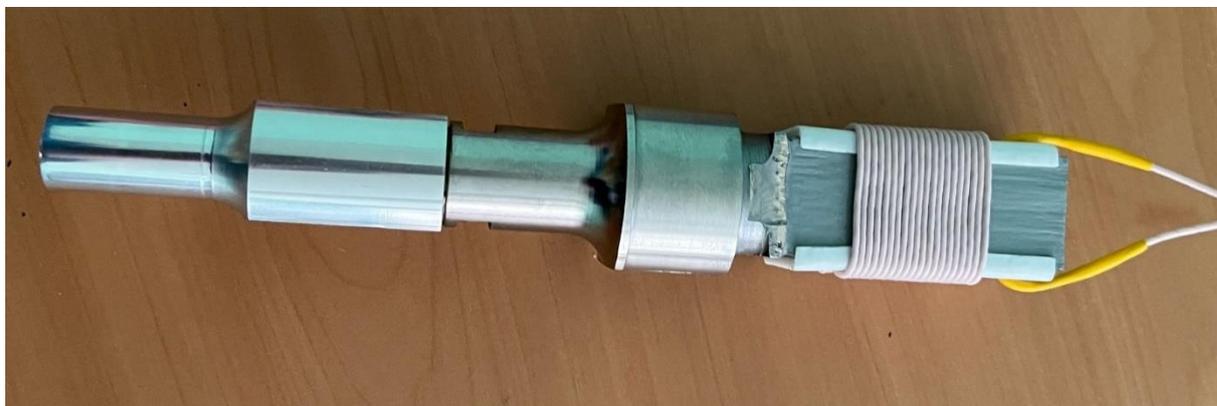


Рисунок 39 – Ультразвуковая колебательная система

Для проведения исследований было изготовлено пять волноводов из титанового сплава ВТЗ-1 (рисунок 40), на которые были нанесены различные типы покрытий.



Рисунок 40 – Титановый волновод с покрытием

В качестве покрытий были использованы:

- алюминий;
- сплав АМг4;
- никель;
- сплав ВК6;
- сплав ВК8;
- сплав ВК10.

Покрытие на волноводы наносили электроискровым методом вручную с помощью лабораторной установки ENPO UR-121 (рисунок 41).



Рисунок 41 – Установка ENPO UR-121

Опытный волновод с покрытием на основе никеля был разрезан в сечении с целью определения толщины слоя нанесенного покрытия на электронном микроскопе (рисунок 42).

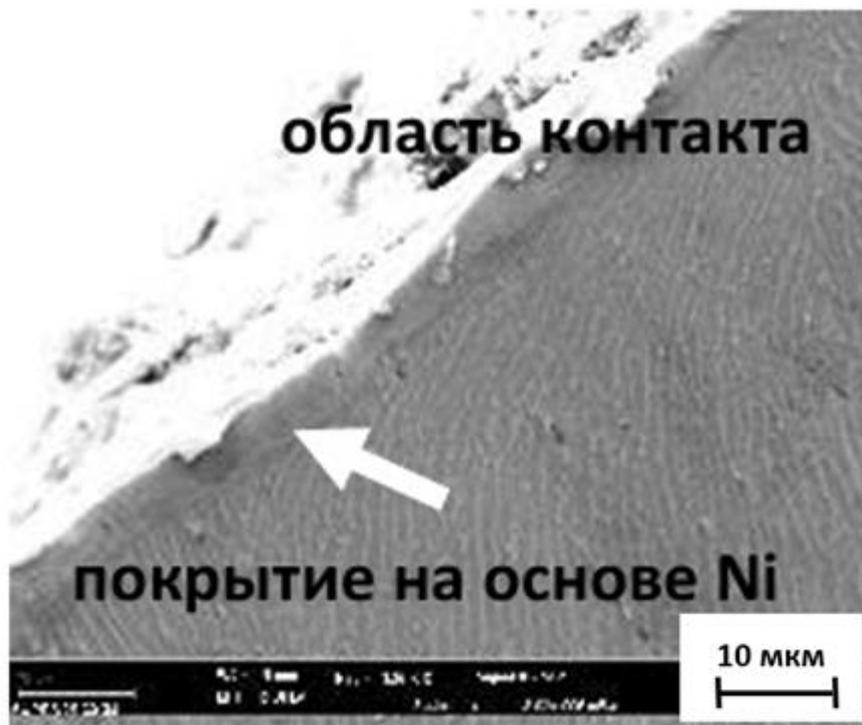


Рисунок 42 – Слой покрытия на основе никеля

Согласно исследования толщина покрытия в среднем составила порядка пяти микрометров.

В качестве образцов для проведения исследования в условиях производства выбрали подоконную накладку дверной карты автомобиля LADA Vesta, выполненную из Softell TKG 300N C13034.

Каждую 1000 циклов производили демонтаж волновода с покрытием, для изучения степени износа.

Степень износа волноводов оценивали путем измерения площади образующихся впадин на торце волновода.

Процесс ультразвуковой сварки происходил в автоматическом режиме на следующих режимах:

- частота колебаний – $30 \pm 0,5$ кГц;
- мощность на выходе – 900...1000 Вт;
- время сварки – 3 с;
- сварочное усилие – 4 кгс/см².

Ультразвуковую сварку осуществляли на многоточечных линиях компании CES (рисунок 43).



Рисунок 43 – Линия для ультразвуковой сварки дверной карты

Выводы по главе

Описаны материал и конструкция объекта исследования, которым является дверная карта автомобиля Lada Vesta.

Разработана ультразвуковая колебательная система и подобран генератор для проведения исследований.

Разработана методика проведения исследования влияния различных покрытий на износ рабочего торца волноводов.

3 Анализ результатов исследований

3.1 Анализ износа волноводов без покрытия

Изначально корейские автоматические линии были оснащены волноводами из алюминиевого сплава Д16Т. Рабочий торец данных волноводов изнашивался примерно за пять тысяч циклов.

На рисунке 44 представлены фотографии изношенных волноводов из Д16Т.



Рисунок 44 – Изношенные торцы волноводов из Д16Т

Как видно на всех торцах волноводов присутствует характерный лучеобразный износ (рисунок 45) в виде эллипсоидных впадин длиной до трех миллиметров и шириной до одного миллиметра по всей рабочей поверхности.



Рисунок 45 – Лучеобразный износ торцов волноводов

Если на поверхность износа торца волновода (рисунок 46) наложить области его соприкосновения с материалом пина в начальный момент сварки (темно-зеленая область) и область соприкосновения в конечный момент с материалом сварной точки (светло-зеленая область), то можно заметить, что очаги износа не выходят за область контакта торца волновода в начальный момент ультразвуковой сварки.

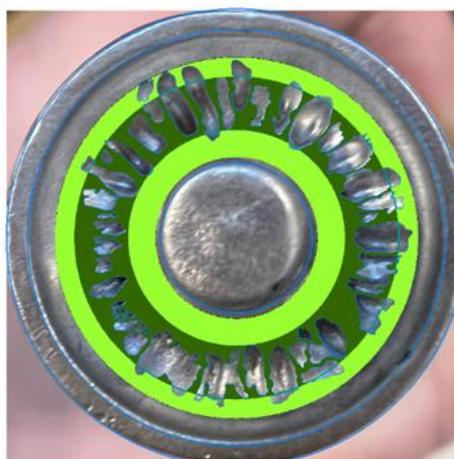


Рисунок 46 – Области контакта волновод-пин

На рисунке 47 представлена схема пятен контакта торца волновода с поверхностями полимера.

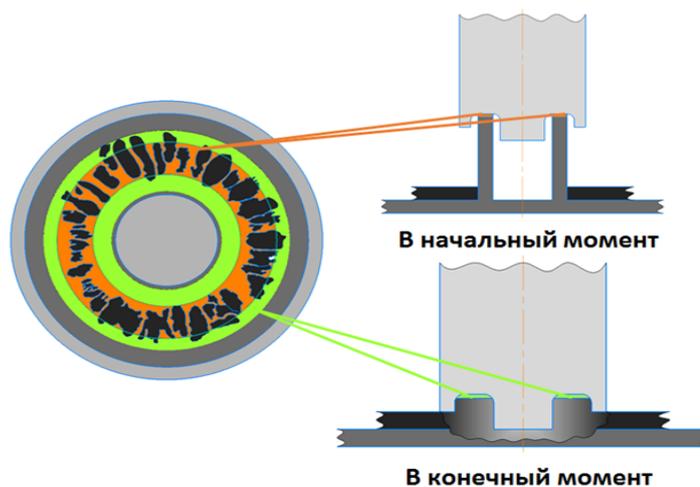


Рисунок 47 – Схема областей контакта волновода с полимером

Такой же лучеобразный характер износа был отмечен и на титановых волноводах (рисунок 48), ресурс которых составляет около десяти тысяч ЦИКЛОВ.

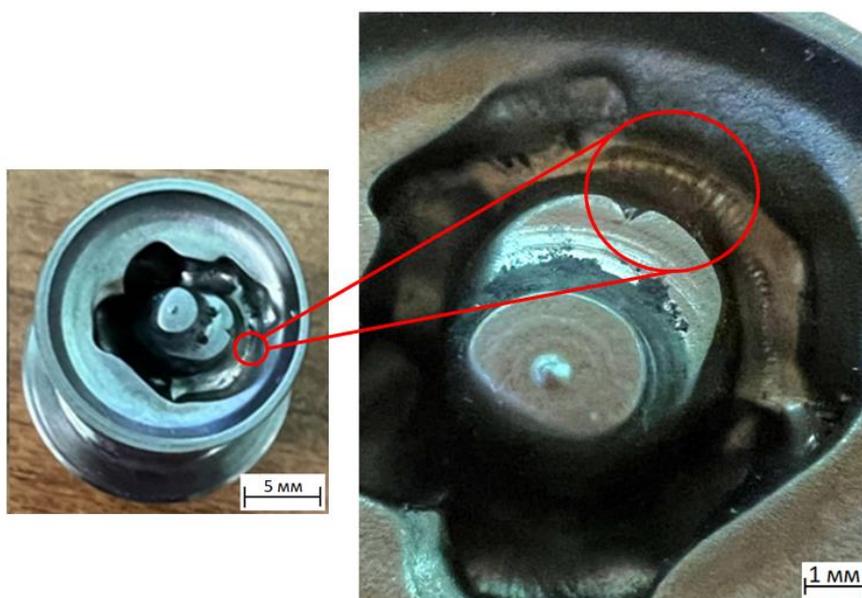
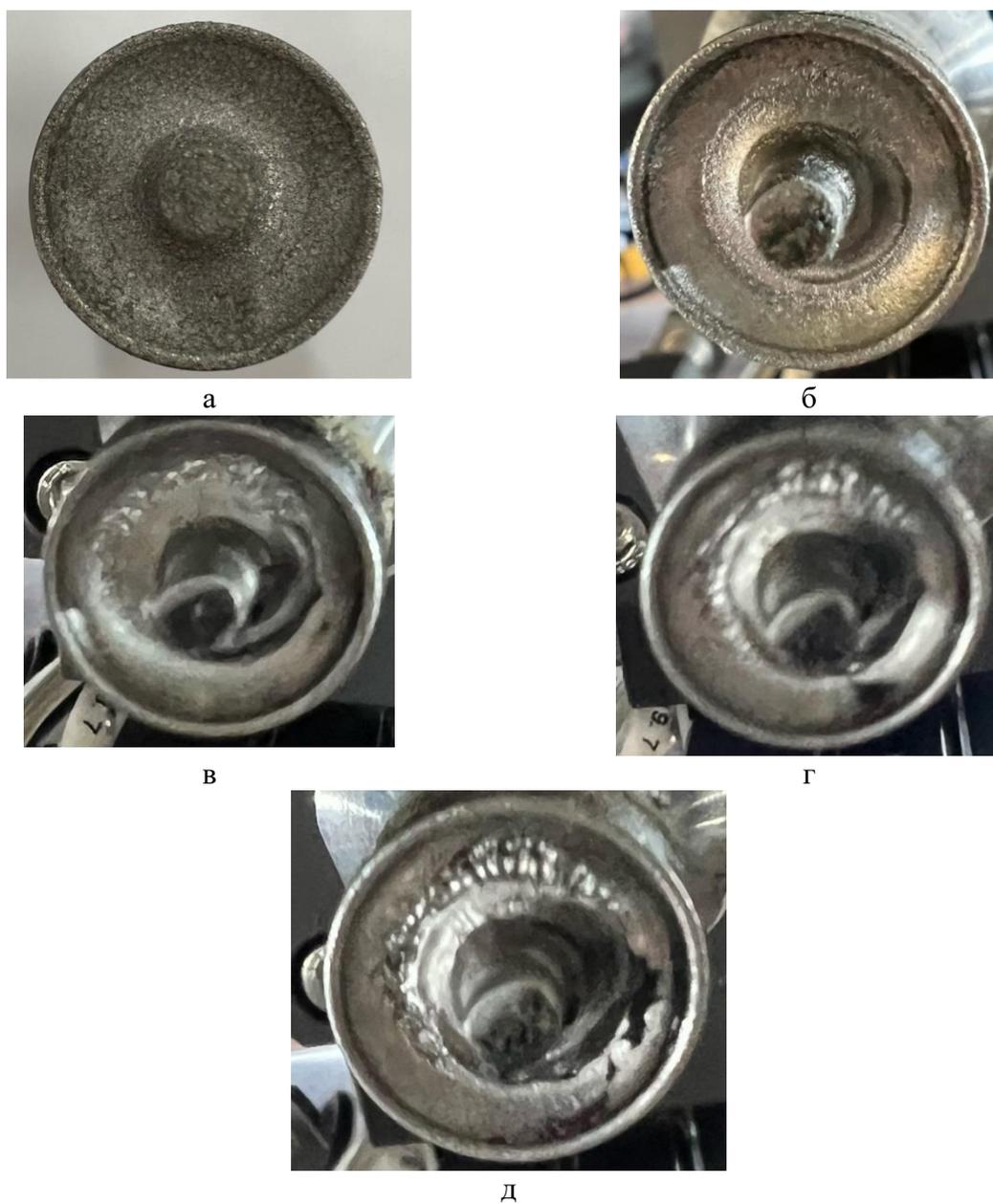


Рисунок 48 – Износ титанового волновода без покрытия

3.2 Анализ износа волноводов с различными типами покрытий

На рисунке 49 представлены фотографии волновода с покрытием на основе алюминия с разной степенью износа рабочей поверхности торца в результате ультразвуковой сварки.



а – 0 деталей, б – 1000 деталей, в – 2000 деталей, г – 3000 деталей, д – 4000 деталей

Рисунок 49 – Износ волновода с покрытием на основе алюминия

На рисунке 50 представлены фотографии волновода с покрытием на основе алюминия-магниевого сплава АМг4 с разной степенью износа рабочей поверхности торца в результате ультразвуковой сварки.



а



б



в



г



д

а – 0 деталей, б – 1000 деталей, в – 2000 деталей, г – 3000 деталей, д – 4000 деталей

Рисунок 50 – Износ волновода с покрытием на основе сплава АМг4

На рисунке 51 представлены фотографии волновода с покрытием на основе твердого сплава ВК6 с разной степенью износа рабочей поверхности торца в результате ультразвуковой сварки.



а



б



в



г



д

а – 0 деталей, б – 1000 деталей, в – 2000 деталей, г – 3000 деталей, д – 4000 деталей

Рисунок 51 – Износ волновода с покрытием на основе ВК6

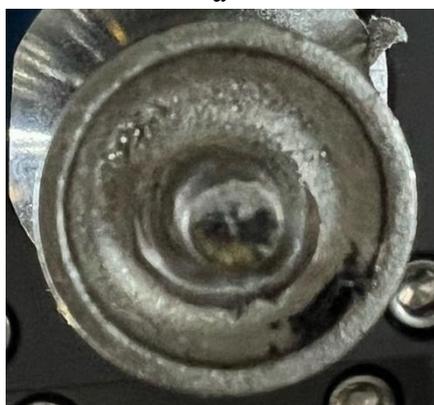
На рисунке 52 представлены фотографии волновода с покрытием на основе никеля с разной степенью износа рабочей поверхности торца в результате ультразвуковой сварки.



а



б



в



г



д

а – 0 деталей, б – 1000 деталей, в – 2000 деталей, г – 3000 деталей, д – 4000 деталей

Рисунок 52 – Износ волновода с покрытием на основе никеля

На рисунке 53 представлены фотографии волновода с покрытием на основе твердого сплава ВК10 с разной степенью износа рабочей поверхности торца в результате ультразвуковой сварки.



а



б



в



г

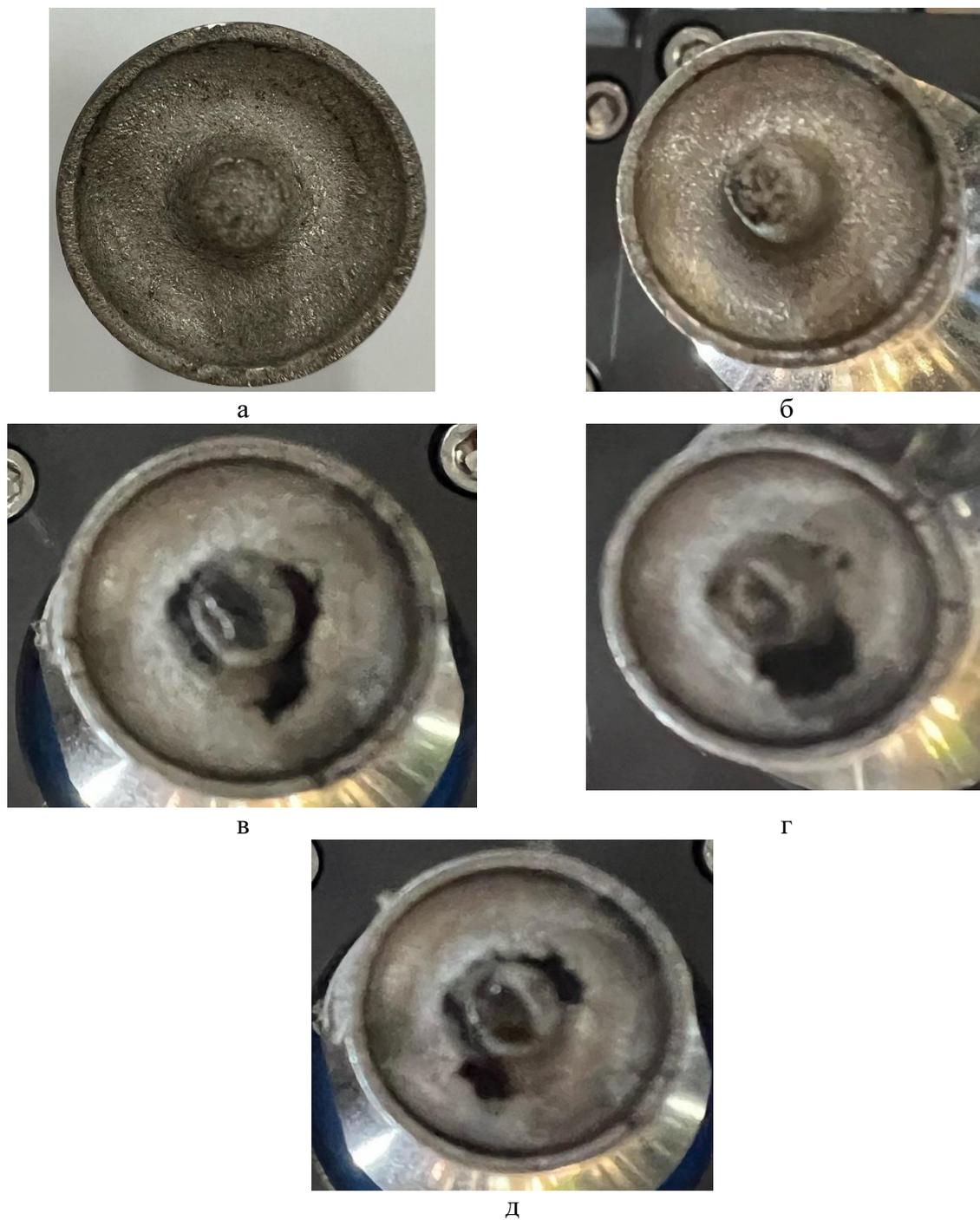


д

а – 0 деталей, б – 1000 деталей, в – 2000 деталей, г – 3000 деталей, д – 4000 деталей

Рисунок 53 – Износ волновода с покрытием на основе ВК10

На рисунке 54 представлены фотографии волновода с покрытием на основе твердого сплава ВК8 с разной степенью износа рабочей поверхности торца в результате ультразвуковой сварки.



а – 0 деталей, б – 1000 деталей, в – 2000 деталей, г – 3000 деталей, д – 4000 деталей

Рисунок 54 – Износ волновода с покрытием на основе ВК8

На рисунке 55 показаны фотографии всех исследуемых покрытий для проведения качественного анализа.

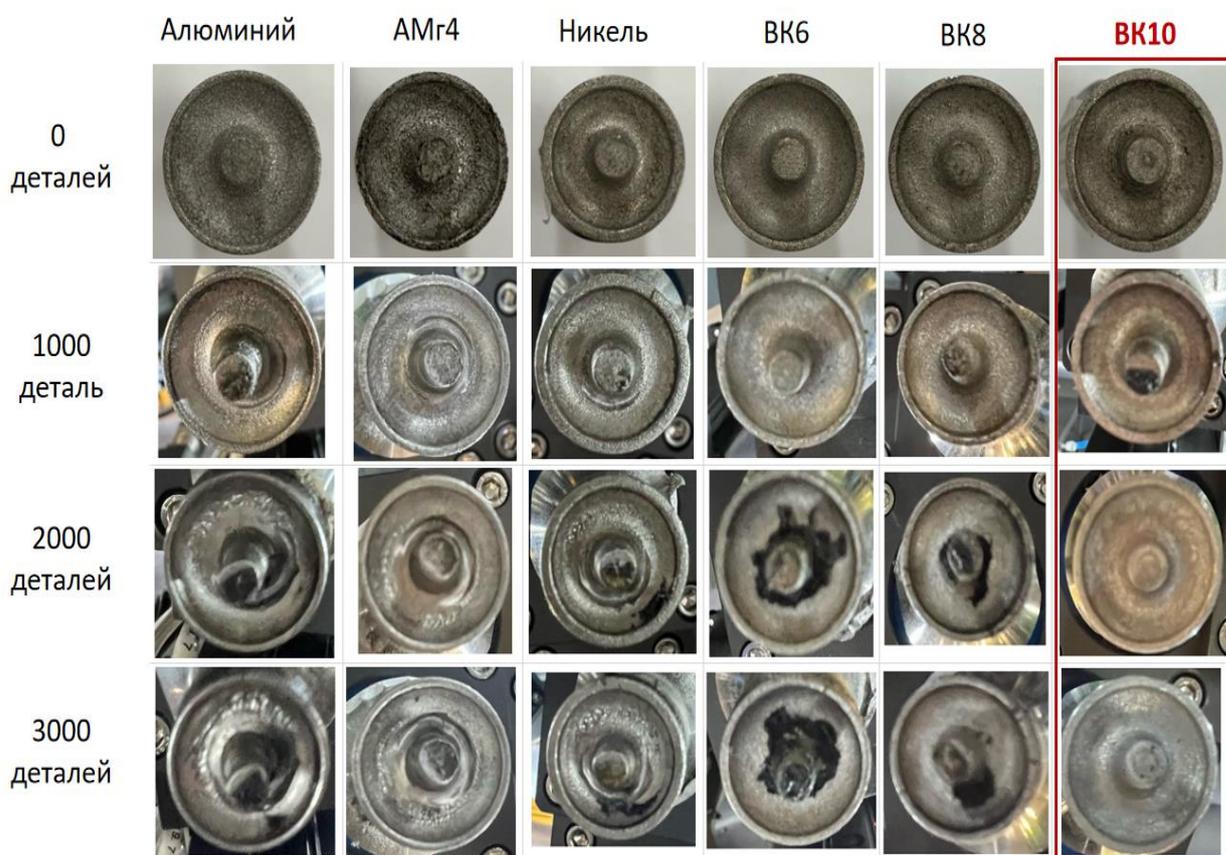


Рисунок 55 – Изношенные торцы волноводов с различными покрытиями

Наихудшую износостойкость показали покрытия на основе алюминия, АМг4 и никеля, так как первые очаги износа на рабочих торцах волноводов в процессе ультразвуковой сварки на них появились в пределах тысячи сваренных деталей.

Покрытия на основе твердых сплавов ВК6 и ВК8 показали хорошие результаты по износостойкости, однако при длительной работе было замечено налипание полимерного материала к торцу волновода, что приводило к вырыванию сварной точки при отводе ультразвуковой колебательной системы, а, следовательно, и потери прочности получаемого соединения.

Покрытие на основе ВК10 показало наилучшие результаты из всех, так как за время проведения испытаний на торце волновода не образовалось очагов износа, а также не было замечено налипание полимерного материала.

Было принято решение продолжить проведения исследований волновода с кобальтовым покрытием по появлении первых очагов износа и выхода его из работоспособного состояния (рисунок 56).

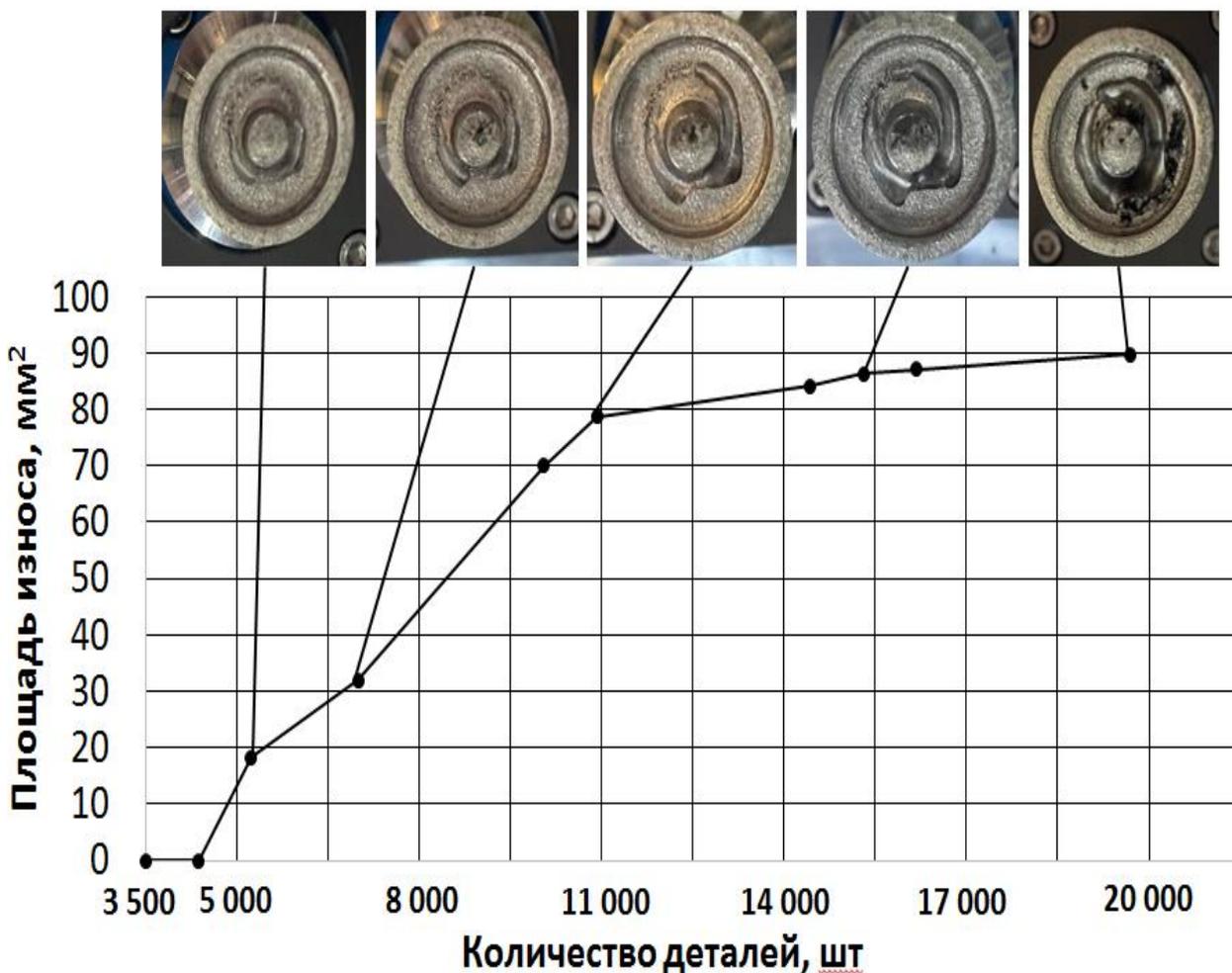


Рисунок 56 – Результаты испытаний покрытия на основе кобальта

Как видно первые очаги износа покрытия начинаются после пяти тысяч сваренных деталей, после чего идет резкое увеличение площади износа.

Однако не наблюдается зарождение новых очагов износа, происходит увеличение площади двух очагов, которые появились изначально, как следствие износа материала волновода, а не покрытия.

После одиннадцати тысяч циклов ультразвуковой сварки наблюдается зарождение небольших, до одного миллиметра, новых очагов износа, а также уменьшение темпа роста площади износа, связанное с увеличением глубины износа волновода.

Волновод с покрытием на основе кобальта потерял свою работоспособность после 19 874 сваренных деталей, что практически в два раза больше чем у волноводов из титанового сплава ВТЗ-1 и почти в четыре раза больше чем у волноводов из алюминиевого сплава Д16Т.

Также при большой степени износа после семнадцати тысяч сваренных деталей было отмечено незначительное налипание полимерного материала на торец волновода, что не оказывало существенного влияния на геометрические параметры получаемой сварной точки [22].

Заключение

В магистерской диссертации разработана методика и оборудование для проведения исследований по влиянию различных типов покрытий на износостойкость рабочих торцов волноводов из титанового сплава ВТЗ-1 при ультразвуковой сварки армированного стекловолокном полипропилена марки Softell TKG 300N C13034.

Проанализировав результаты, были сделаны следующие выводы:

- в процессе ультразвуковой точечной сварки подоконной накладки при сборке дверной карты автомобиля LADA Vesta происходит износ рабочей поверхности ультразвуковых волноводов, который снижает стабильность качества соединения;
- покрытия на основе алюминия, АМг4 и никеля не дают существенного повышения износостойкости титановых волноводов в процессе ультразвуковой сварки;
- покрытия на основе твердых сплавов ВК6 и ВК8 показывают хорошую износостойкость в процессе ультразвуковой сварки. Однако при длительной работе, из-за налипания полимера к рабочему торцу, данные типы покрытий не обеспечивают формирование сварной точки требуемой геометрии;
- на процесс налипания полимерного материала к рабочему торцу волновода при ультразвуковой сварки оказываем влияние содержания кобальта в составе покрытия. Чем выше содержание кобальта, тем меньше степень налипания полимера.
- покрытие на основе твердого сплава ВК10 позволяет существенно повысить износостойкость титановых волноводов в процессе ультразвуковой сварки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Deng L. L., Zhang J. G., Chen Z. Y. Effect of ultrasonic vibration on the crystallization behavior and weld strength of high-density polyethylene // *Journal of Applied Polymer Science*. 2008. № 110. P. 3535–3541.
2. Gokhale M. A., Kulkarni S. V., Bhole P. V. Effect of welding parameters on the quality of ultrasonic welding of polyethylene pipes // *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. № 269. P. 283–290.
3. Kim S. J., Lee J. H., Choi J. H. Ultrasonic welding of polypropylene: effect of welding parameters and joint design // *Polymer Engineering and Science*. 2006. № 46. P. 1731–1737.
4. Kuznetsov A. V., Sokolov A. V. Investigation of the influence of welding parameters on the quality of ultrasonic welding of polypropylene // *Advanced Materials Science and Engineering*. 2020. № 10. P. 1–8.
5. Lee J. H., Kim S. J., Choi J. H. Ultrasonic welding of three-dimensional thermoplastic parts using a vibrating horn // *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. № 187. P. 271–276.
6. Lee TH., Fan HT., Li Y., Shriver D., Banu M. Enhanced performance of ultrasonic welding of short carbon fiber polymer composites through control of morphological parameters // *J Manuf Sci Eng*. 2019 № 142. 138 p.
7. Wang K., Li Y., Banu M., Li J., Guo W., Khan H. Effect of interfacial preheating on welded joints during ultrasonic composite welding // *J Mater Process Technol*. 2017. № 246. P. 116–22.
8. Wang K., Shriver D., Banu M., Hu SJ., Fan HT. Performance prediction for ultrasonic spot welds of short carbon-fiber reinforced composites // *J Manuf Sci Eng*. 2017; № 139. P. 136–142.
9. Zhang Y. F., Lee L. H., Chang C. H. Microwave-assisted ultrasonic welding of polymeric materials // *Journal of Applied Polymer Science*. 2010. № 116. P. 2053–2060.

10. Анализ мирового рынка углепластиков [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchandmarkets.com/> (дата обращения: 01.03.2024).
11. Анализ рынка пластиков для электромобилей [Электронный ресурс]. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/> (дата обращения: 01.03.2024).
12. Волков С. С., Яматов Р.Г. Применение пластмасс. // Передовое материаловедение и инженерия. 1979. № 17. С. 41–48.
13. Волков С.С. Сварка пластмасс ультразвуком. Москва. : Химия, 1986. 256 с.
14. Закат эпохи стали, почему мы скоро увидим пластиковый автомобиль [Электронный ресурс]. URL: <https://www.forbes.ru/biznes/347665> (дата обращения: 28.12.2023).
15. Катаев Р.Ф. Сварка пластмасс : учебное пособие. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2008. 138 с.
16. Марочный ассортимент композиционных материалов [Электронный ресурс]. URL: http://polimpartner.by/wp-content/uploads/2018/09/Katalog_na_marochnyj_assortiment.pdf (дата обращения: 28.12.2023).
17. Медведева Т.П., Кащенко Е.Г., Рябикова Н.Е. Товароведение и экспертиза промышленных товаров из пластмасс : учебное пособие. Оренбург : ГОУ ОГУ, 2007. 138 с.
18. Мельникова М.А. Полимерные материалы, свойства, практическое применение : учебное пособие. Благовещенск : Амурский гос. ун-т., 2013. 86 с.
19. Обзор мировой полимерной индустрии [Электронный ресурс]. URL: https://polyprofi.ru/blogs/Blog_Poly_and_Pro/obzor-mirovoy-polimernoy-industrii.php (дата обращения: 28.12.2023).
20. Огин К. И., Мацюк Л. Н., Богдашевский А. В. Сварка полимерных материалов. М. : Машиностроение, 1988. 312 с.
21. Свойства Softell-ТКГ-300N [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lyondellbasell.com/en/polymers/p/Softell-ТКГ-300N> (дата обращения: 01.05.2024).

22. Спиридонов Н.Г., Мурашкин С.В., Селиванов А.С., Нурмеев Д.Р., Соколов В.В. Качественный анализ износа рабочих торцов волноводов во время ультразвуковой сварки армированных стекловолокном полимерных материалов // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: V Международная научная конференция. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2025. С. 76–77.
23. Теумин И.И. Ультразвуковые колебательные системы. М. : Машиностроение, 1959. 332 с.
24. Технология сварки нагретым инструментом полиэтиленовых труб [Электронный ресурс]. URL: <https://infopedia.su/10xd6cb.html> (дата обращения: 10.04.2024).
25. Технология сварки пластмасс нагретым газом [Электронный ресурс]. URL: https://asv0825.ru/svarka_plastmass/10.html (дата обращения: 10.04.2024).
26. Ультразвуковое оборудование [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dukane.eu/en/> (дата обращения: 01.03.2024).
27. Ультразвуковое оборудование [Электронный ресурс]. URL: <https://www.herrmannultrasonics.com/en-us/> (дата обращения: 01.03.2024).
28. Ультразвуковое оборудование [Электронный ресурс]. URL: <http://www.petsonic.ru> (дата обращения: 12.05.2024).
29. Ультразвуковое оборудование [Электронный ресурс]. URL: <https://ultrasonic.ru/> (дата обращения: 01.03.2024).
30. Холопов Ю. В. Машиностроение: ультразвук: УЗС, БУФО, ГЕО. Санкт-Петербург. : ООО «Типография «Береста», 2008. 328 с.
31. Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. Л. : Машиностроение ; Ленингр. отд-ние, 1988. 224 с.