

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Нанотехнологии, материаловедение и механика»

(наименование)

22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки)

Гибридные и комбинированные технологии обработки и модификации перспективных  
материалов

(направленность (профиль))

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Влияние формы рабочего торца инструмента в процесс ультразвуковой сварки  
пластмасс на прочность сварного соединения

Обучающийся

В.В. Еник

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

канд. тех. наук, доцент А.С. Селиванов

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

Консультант

канд. тех. наук, доцент С.В. Мурашкин

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

Тольятти 2024

## Содержание

Введение .....	3
1 Общие сведения о пластмассах .....	5
2 Методы и виды сварки пластмасс .....	10
3 Сущность метода ультразвуковой сварки пластмасс .....	14
4 Аналитический обзор методов оценки качества сварных соединений пластмасс .....	17
5 Экспериментальная часть.....	20
5.1 Выбор материала .....	20
5.2 Выбор метода испытания.....	21
5.3 Подготовка и изготовление образцов .....	26
5.4 Оборудование для проведения испытаний.....	31
5.5 Проведение испытаний .....	33
6 Обработка экспериментальных данных.....	36
6.1 Представление первичных измерений.....	36
6.2 Статистическая обработка результатов серий измерений .....	48
6.3 Статистический анализ экспериментальных данных .....	52
6.4 Корреляционный анализ .....	56
Заключение .....	65
Список используемой литературы и используемых источников .....	67

## Введение

«Актуальность и научная значимость настоящей исследовательской работы подтверждается востребованностью решения проблемы повышения прочности сварного соединения пластмассовых материалов и изучения зависимости прочности от разных влияющих на прочность факторов. Очевидно, что прочность и долговечность очень важны для эксплуатации абсолютно всех изделий» [1-3]. Уже на этапе проектирования мы определяем требования, которые позволят использовать ту или иную деталь в заданных для нас условиях с необходимыми характеристиками. Несмотря на то, что пластики используются уже довольно давно, их свойства и поведение в процессе эксплуатации изучены хуже, чем у металлов. Поэтому исследования свойств пластмассовых материалов продолжают и по сей день. Особенно интересны прочностные характеристики пластмасс и то, как различные факторы влияют на их прочность.

«Пластмассовые материалы широко распространены в современном мире. Трудно найти области и сферы нашей жизни, в которых не применялись бы пластмассы и изделия из них. Пластики начали свой путь с одноразовой посуды, тары, упаковки. Со временем, изделия из пластика вошли во все отрасли промышленности, в машиностроение, медицину. Пластик в какой-то мере вытеснил и заменил другие материалы: металл, дерево, стекло, бумагу (при упаковке продуктов). Сложно вспомнить, как мы жили, например, без элементарных пластиковых пакетов, а ведь массовое распространение в нашей стране они получили всего каких-то 30-40 лет назад. В медицине без пластмассовых одноразовых шприцов никто даже не представляет себе проведение медицинских процедур. Младенцы с рождения используют пластмассовые бутылочки и игрушки.

Пластмассовые материалы в первоначальном виде представляют собой небольшие гранулы до четырех миллиметров в длину. Переработка пластмасс в изделия происходит разными методами: литьем под давлением, выдуванием,

термоформованием, экструзией. Изделия из пластмасс могут обрабатываться механической обработкой, также они могут соединяться между собой сваркой.

Пластики прочно вошли в нашу жизнь. Они имеют достаточно преимуществ по сравнению с традиционными материалами, это дешевизна, легкость, прочность, химическая стойкость, быстрый способ переработки, способность легко и с минимальным усилием получать изделия сложных форм и в больших количествах» [4-6].

Гипотеза: форма торца рабочего инструмента для ультразвуковой сварки и прочность сварного соединения пластмасс связаны между собой, и эта связь имеет возрастающий характер. Гипотеза будет проверена экспериментально, в частности, при исследовании сварных соединений образцов из пластмассы.

Цель работы – изучить, как форма торца ультразвукового инструмента для сварки влияет на прочность сварного соединения пластмасс.

Задачи:

- выбрать подходящую для исследования методику проведения эксперимента;
- изготовить заготовки из полипропилена, марки «Бален»;
- произвести сварные соединения из полипропилена с использованием различных насадок для ультразвуковой сварки при помощи специального оборудования – УЗ-стенда;
- провести серии испытаний по определению прочностных характеристик сваренных образцов с помощью испытательной машины Zwick / Roell Z010.

Определить влияние формы торца на прочность сварного соединения.

## **1 Общие сведения о пластмассах**

Пластмассы – это материалы, получаемые из полимеров, которые могут быть подвергнуты пластической деформации при нагревании и охлаждении. Пластмассы обладают такими свойствами, как легкость, прочность, устойчивость к воздействию воды и химических веществ, а также электроизоляционные свойства.

Пластмассы широко применяются в различных отраслях промышленности, таких как производство упаковочных материалов, автомобильной промышленности, медицине, электротехнике, строительстве и другие.

Существует несколько основных видов пластмасс: термопласты, термосеты и эластомеры. Термопласты могут многократно плавиться и изменять форму, термосеты после отверждения не могут быть реактивированы, а эластомеры обладают высокой эластичностью.

Пластмассы могут быть натуральными (например, каучук) или синтетическими, произведенными из нефтепродуктов. Некоторые из самых распространенных синтетических пластмасс включают полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид, полистирол и поликарбонат.

Основные свойства пластмасс включают:

- легкость: Пластмассы легче многих других материалов, что делает их удобными для использования в производстве легких изделий;
- изоляционные свойства. Пластмассы обладают хорошей изоляцией от электричества и тепла, поэтому они широко используются в электротехнике и строительстве;
- устойчивость к воздействию химических веществ. Некоторые виды пластмасс не подвержены воздействию воды, кислот, щелочей и других химических веществ, что делает их долговечными и надежными;

– эластичность. Некоторые пластмассы обладают способностью упруго деформироваться и возвращаться к исходной форме при снятии воздействия нагрузки;

– экономичность. Пластмассы отличаются относительно низкой стоимостью и легкостью в обработке.

Эти свойства делают пластмассы важным и широко используемым материалом в различных областях промышленности, строительства, медицины и других сферах.

«Пластмассы различают по своей структуре – кристаллические и аморфные. Однако кристаллические полимеры, в отличие от металлов, характеризуются «степенью кристалличности» – содержанием кристаллических областей в своей структуре. При переходе из вязко-текучего состояния в твердое, макромолекулы кристаллических полимеров образуют упорядоченные ассоциации-кристаллиты преимущественно в виде сферолитов. Чем меньше скорость охлаждения расплава термопласта, тем крупнее вырастают сферолиты. Однако и в кристаллических полимерах всегда остаются аморфные участки. Изменяя скорость охлаждения, можно регулировать структуру, а, следовательно, свойства сварного соединения» [7].

«При температуре ниже температуры стеклования полимер обладает свойствами твердого тела (участок 1 рисунок 1). Зависимость температуры стеклования от молекулярной массы полимера прямо пропорциональна. При нагревании выше температуры стеклования увеличивается подвижность цепи макромолекулы полимера, и полимер переходит в высокоэластическое состояние (участок 2 рисунок 1), а при дальнейшем нагревании – в вязкотекучее состояние (участок 3 рисунок 1). Эти переходы наблюдаются на термомеханической кривой – зависимости деформации от температуры пластмасс, и являются технологическими характеристиками, имеющими значение при переработке пластмасс в изделия. Пример термомеханической

кривой приведен на рисунке 1. Образование сварного соединения происходит при нагревании пластмасс до вязкотекучего состояния» [8-10].

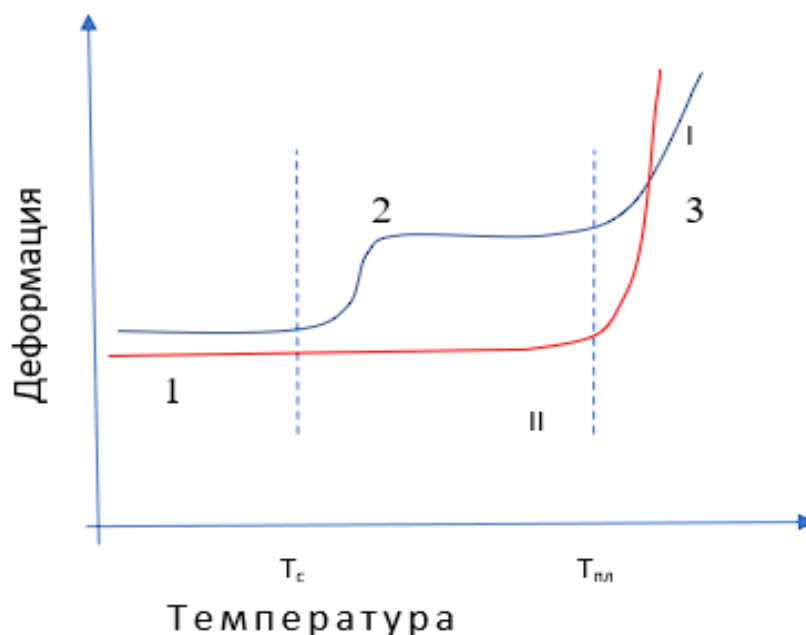


Рисунок 1 – Пример термомеханической кривой аморфного и кристаллического полимера

«Пластмассы в обычном состоянии при комнатной температуре представляют собой твердые гранулы сферической или цилиндрической формы (в зависимости от способа их получения) длиной 3-5 мм, натурального цвета или окрашенные в массу. Для переработки пластмасс в изделия очень широко применяются термопластичные материалы, при нагреве они переходят в вязкотекучее состояние, а при охлаждении затвердевают. Это их свойство используют при изготовлении пластмассовых изделий разными методами: экструзией (получение плоских листовых пластиков различной толщины и полимерных полуфабрикатов, применяющихся для дальнейшего использования в получение пластмассовых изделий), выдуванием (получение пластиковых рукавных пленок, труб и других полых объемных изделий), литьем под давлением (получение огромного количества пластмассовых изделий весом от нескольких грамм до нескольких килограмм всевозможных

форм и размеров), термоформованием (получение изделий из листовых пластмассовых материалов, а также, получение многослойных изделий, дублированных, например, кожей или тканью), сваркой (получение сборного соединения, состоящего из нескольких пластмассовых деталей). Широкое использование полимеров связано с особенностью иметь высокую прочность в сочетании с обратимой деформацией. Прочностные свойства металлов хорошо изучены, тогда как прочность пластмасс продолжает изучаться, в связи с большим количеством факторов, влияющих на ее значение» [11-13].

«На прочностные свойства пластмасс оказывает влияние: структура и строение полимера, рецептура изготовления полимера, тип и процентное содержание наполнителя, время, прошедшее между изготовлением и испытанием образцов, старение материала (температурное, световое и др.), внутренние дефекты. Существует большое количество методик испытания прочностных характеристик, где важное значение имеет как используемое испытательное оборудование, так и способ изготовления образцов, их размеры, толщина образцов, условия кондиционирования, условия испытания и так далее» [14-16]. Прочностные механические свойства полимеров обычно изучают, разрушая серию стандартизированных образцов, используя универсальную испытательную машину, получая кривую – зависимость нагрузки от деформации образца. Пример зависимостей «нагрузка-деформация» представлен на рисунке 2.

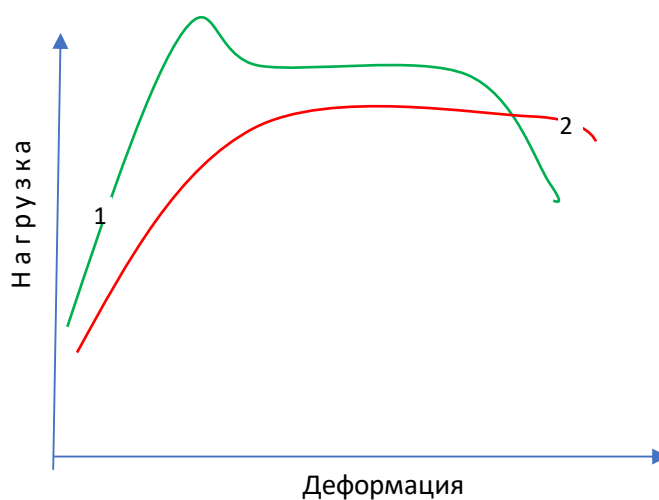




Рисунок 2 – Пример кривой «нагрузка- деформация»

Полимер	Формула полимера	Формула мономера
Полиэтилен	$(-\text{CH}-\text{CH}_2-)_n$	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$
Полипропилен	$(-\text{CH}-\text{CH}_2-)_n$   $\text{CH}_3$	$\text{CH}=\text{CH}_2$   $\text{CH}_3$
Полистирол	$(-\text{CH}-\text{CH}_2-)_n$   	$\text{CH}-\text{CH}_2$   
Поливинилхлорид	$(-\text{CH}-\text{CH}_2-)_n$   $\text{Cl}$	$\text{CH}=\text{CH}_2$   $\text{Cl}$
Тефлон	$(-\text{CF}_2-\text{CF}_2-)_n$	$\text{CF}_2=\text{CF}_2$
Полиметилметакрилат	$(-\text{C}-\text{CH}_2-)_n$   $\text{CH}_3$   $\text{C}=\text{O}$   $\text{O}-\text{CH}_3$	$\text{C}=\text{CH}_2$   $\text{CH}_3$   $\text{C}=\text{O}$   $\text{O}-\text{CH}_3$
Полибутадиен	$(-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-)_n$	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$
Бутадиенстирольный каучук	$(-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-)_n$	$\text{CH}=\text{CH}_2$   $\text{C}_6\text{H}_5$ + $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$

Рисунок 3 – Основные синтетические полимеры

Основные синтетические полимеры, что широко используются в промышленности представлены на рисунке 3.

## 2 Методы и виды сварки пластмасс

Сварка пластмасс – это процесс соединения двух или более пластмассовых деталей путем нагрева их до пластичного состояния, после чего они соединяются для образования прочного соединения.

Существует несколько методов и видов сварки пластмасс, включая:

- термоконтатная;
- термоимпульсная;
- сварка токами высокой частоты;
- ультразвуковая сварка;
- газовая;
- расплавом полимера;
- трением.

На рисунках 4 – 7 представлены примеры существующих способов сварки с использованием различных технологий.



Рисунок 4 – Процесс термоимпульсной сварки



Рисунок 5 – Процесс индукционной сварки



Рисунок 6 – Процесс сварки расплавом полимера



Рисунок 7 – Процесс газовой сварки

Основные технологические характеристики сварки пластмасс включают следующие:

- температура: пластмассы требуют определенной температуры для того, чтобы они стали достаточно пластичными для сварки. Разные типы пластмасс имеют различные температурные требования для сварки;
- давление: давление играет ключевую роль в процессе сварки пластмасс. Необходимо применять определенное давление, чтобы обеспечить хорошее слияние молекул пластика и создать качественное сварное соединение;
- время нагрева и охлаждения: важно соблюдать оптимальное время нагрева пластмассы для достижения пластичности, а затем также контролировать процесс охлаждения для фиксации сваренных деталей;
- контроль качества: после сварки необходимо провести контроль качества сваренных соединений, чтобы убедиться в их прочности, герметичности и других характеристиках соединения.

Типы сварных соединений пластмасс приведены на рисунке 8.

# ВИДЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

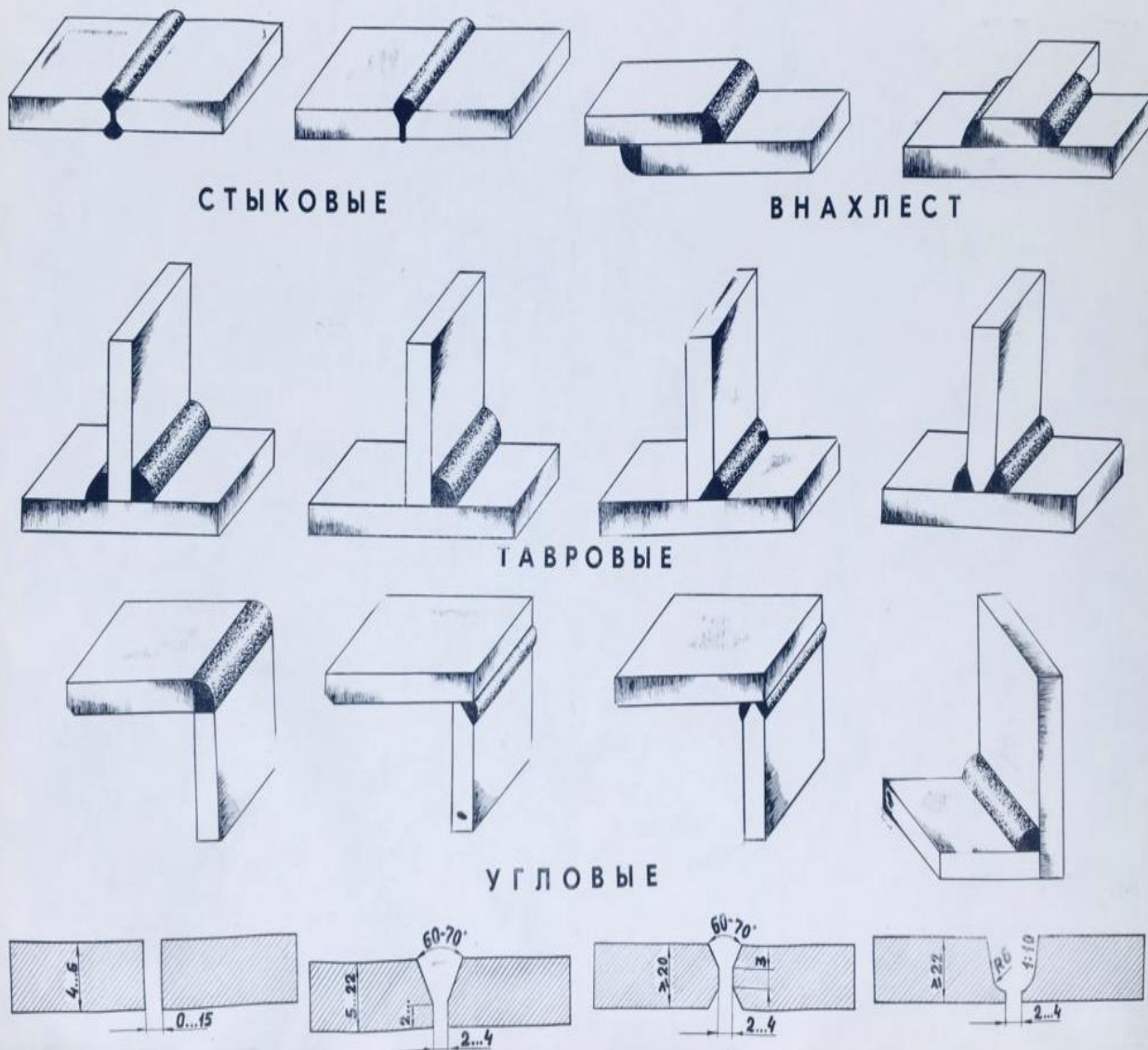


Рисунок 8 – Виды сварных соединений пластмасс

Описанные выше основные технологические характеристики важны для обеспечения эффективного и качественного процесса УЗС.

### 3 Сущность метода ультразвуковой сварки пластмасс

УЗС пластмасс заключается в использовании ультразвуковых колебаний для создания локального повышения температуры и давления в зоне сварки. Это позволяет соединять пластиковые детали без плавления материала, что обеспечивает высокую прочность сварного соединения.

Процесс ультразвуковой сварки пластмасс состоит из следующих основных этапов:

- подготовка: Пластиковые детали должны быть подготовлены к процессу ультразвуковой сварки. Обычно это включает в себя очистку поверхностей, подготовку краев деталей;
- нагрев: Ультразвуковой инструмент принимает высокочастотную вибрацию, которая создает тепло в зоне контакта между деталями. Это приводит к плавлению поверхностей пластмасс и образованию молекулярной связи;
- сжатие и охлаждение: под воздействием давления от ультразвукового инструмента свариваемые детали прижимаются, обеспечивая качественное соединение. После достижения оптимального времени свариваемые детали остаются в сжатом состоянии до полного охлаждения для фиксации сварного соединения.

Активированная поверхность пластмассы для сварки обеспечивает лучшее сцепление и качество соединения между пластмассовыми деталями. Для активации поверхности перед сваркой может использоваться специальные адгезионные препараты или методы, такие как плазменная обработка или ультразвуковая очистка. «Ультразвуковая очистка – это метод очистки поверхности материала с использованием ультразвуковых волн. Процесс основан на создании мельчайших пузырьков воздуха в жидкости, которые при колебаниях ультразвуковых волн создаются и коллапсируют» [17-20]. Это создает микроскопические струи жидкости, которые могут

эффективно удалять загрязнения, грязь, масла и другие загрязнения с поверхности. Ультразвуковая очистка (рисунок 9) широко используется для подготовки поверхностей перед сваркой, лакированием, покрытием и другими процессами обработки.



Рисунок 9 – процесс ультразвуковой очистки

Процесс УЗС и устройство УЗКС в сборе представлены на рисунках 10 и 11.



Рисунок 10 – Процесс УЗС при помощи сварочного пистолета

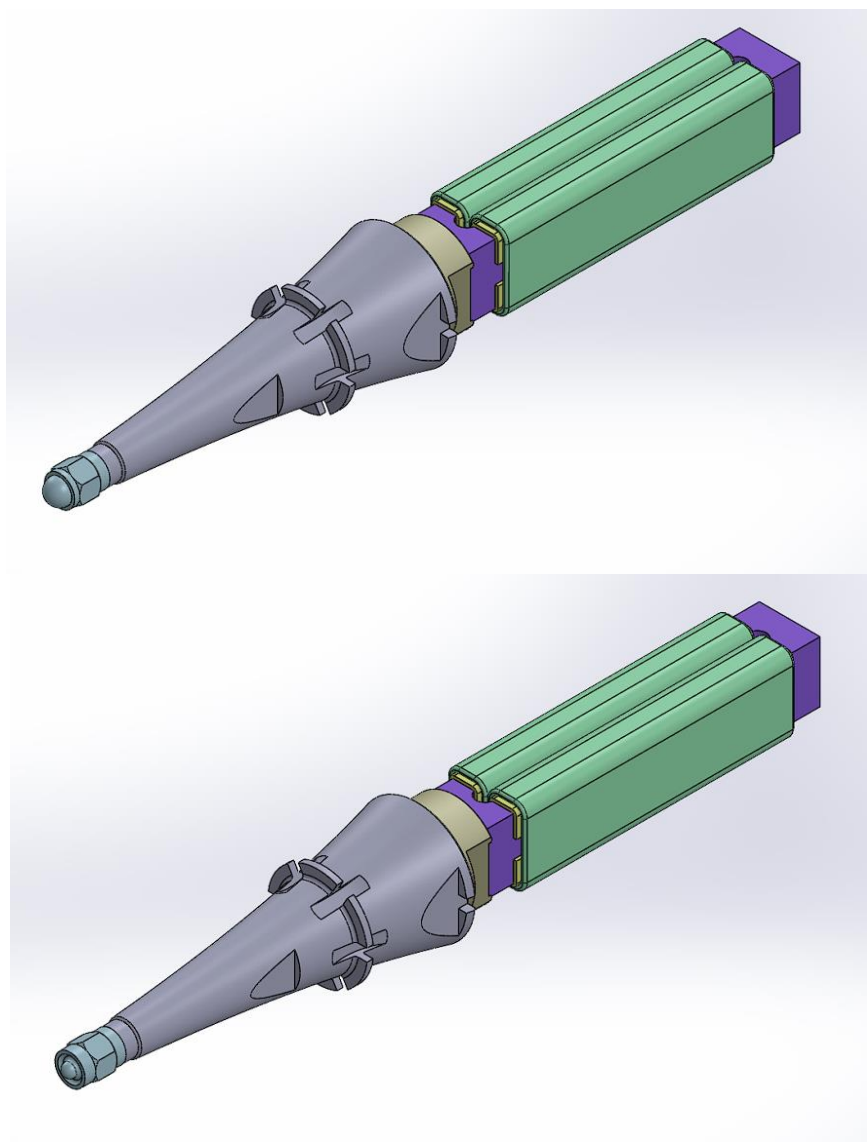


Рисунок 11 – Примеры конструкции УЗКС в сборе

Ультразвуковая очистка обеспечивает эффективное удаление загрязнений даже с труднодоступных участков поверхности, не повреждая сам материал.

Ультразвуковая очистка также может помочь улучшить адгезию материалов и обеспечить более качественное сварное соединение.

Это позволяет обеспечить более прочное соединение и улучшить качество сварочного шва.



#### **4 Аналитический обзор методов оценки качества сварных соединений пластмасс**

Методы оценки качества сварных соединений пластмасс включают в себя:

- визуальный осмотр: сварное соединение тщательно осматривается на наличие видимых дефектов, таких как непровары, наплывы, трещины, поры и инородные включения;
- измерение толщины шва: с помощью специальных приборов или шаблонов измеряется толщина сварного шва, которая должна соответствовать требованиям технических условий;
- испытание на прочность: образец сварного соединения подвергается механическим испытаниям на растяжение, изгиб или сдвиг для определения его прочности и пластичности;
- испытание на герметичность: образец подвергается гидравлическим или пневматическим испытаниям для проверки его герметичности и способности выдерживать давление;
- испытания на теплостойкость: образцы сварного соединения подвергаются воздействию высоких температур для определения их термической стабильности и способности сохранять форму и размеры;
- анализ при помощи ультразвука: используется для обнаружения внутренних дефектов, таких как поры, трещины и непровары. Ультразвуковые волны проникают сквозь материал и отражаются от границ раздела сред, что позволяет обнаружить дефекты.

«Существуют различные неразрушающие методы качественной оценки сварного соединения. Некоторые из них требуют специального оборудования, некоторые малоприменимы из-за вредных условий (рентгенографическая дефектоскопия, капиллярная дефектоскопия)» [21-23].

К неразрушающим методам контроля сварного шва.

- Ультразвуковой контроль (УЗК) – этот метод использует ультразвуковые волны для обнаружения дефектов, таких как трещины, включения и недостаточное слияние металла в сварном соединении.
- Магнитопорошковый контроль (МПК) – метод, который использует магнитные свойства материала для обнаружения дефектов, таких как трещины, внутренние поры и другие неоднородности.
- Визуальный контроль (ВК) – простой метод, при котором квалифицированный работник визуально оценивает сварное соединение на предмет поверхностных дефектов.
- Радиография – метод, при котором рентгеновские лучи проходят через сварное соединение, создавая изображение, которое позволяет обнаружить внутренние дефекты.
- Электромагнитный контроль (ЭМК) – метод, который использует электромагнитные поля для обнаружения неоднородностей в материале сварного соединения.

«В рассматриваемой работе исследовали момент образования сварного шва, регулируя температуру нагрева материала. Исследователи изучали термографию сварочного процесса и влияние температуры как на образование шва, так и на свойства сварного соединения пластмассовых материалов. Данные исследования процесса сварки показали, что фиксация температуры сварки при достижении вязко текучего состояния пластмассового материала, позволяла расплаву перемешиваться без дополнительного нагрева. При этом, полученное снижение конечной температуры сварки, как показал эксперимент, приводило к повышению прочности и долговечности пластмассового сварного соединения» [24-27].

«Испытуемый материал данного исследования – листовая полистирольная пластмасса, сваривались образцы размером 100 x 20 x 2 мм швом внахлест. В эксперименте использовалась УЗС, температура

фиксирувалась термопарами. После сварки сварное соединение проходило испытание на растяжение до и после температурного старения в течение десяти суток, для оценки долговечности сварного соединения полистирольной пластмассы.

Полученные результаты исследования показаны в таблице 1. Образцы сварных соединений были получены существующим и предлагаемым способами, где  $\delta_g$ , % – относительная прочность сварного соединения от прочности образца из основного материала;  $\delta_c$ , % – то же самое после искусственного старения» [28-30].

Таблица 1 – Результаты испытаний сварных соединений полистирольной пластмассы

Способ сварки	Показатели прочности	
	$\delta_g$ , %	$\delta_c$ , %
УЗС с одним акустическим узлом (первым) и опорой	75	55
УЗС по прототипу	80	45
УЗС по предлагаемому способу	90	85

«Достоинством данного исследования является интересная информация о поведении полученного сварного изделия в условиях термического старения, что наглядно характеризует свойства сварных соединений, изменяющихся во времени при их эксплуатации, и вносит вклад в проблему изучения прочности сварных соединений из пластмасс» [31].

## **5 Экспериментальная часть**

### **5.1 Выбор материала**

В качестве материала был выбран полипропилен, так как он является одним из самых применяемых в автомобильной промышленности. Полипропилен – это полимер, который широко используется в различных отраслях промышленности благодаря своим химическим и физическим свойствам. ПП является термопластичным полимером, что означает, что он может быть переработан при нагревании и затвердевает при охлаждении.

Ниже приведены основные характеристики и применения полипропилена.

**Химическая стойкость:** ПП устойчив к различным химическим реагентам, включая разбавленные кислоты и щелочи, что делает его прекрасным материалом для контакта с химически агрессивными веществами.

**Термостабильность:** полипропилен обладает хорошей стабильностью при высоких температурах, что делает его подходящим для применения в термостабильных условиях.

**Легкость и прочность:** ПП обладает низкой плотностью, при этом обладая высокой прочностью и ударопрочностью.

**Электрические свойства:** полипропилен является изоляционным материалом с хорошими электрическими свойствами.

**Устойчивость к влаге:** ПП обладает низкой влагопоглощаемостью, что делает его устойчивым к воздействию влаги.

Полипропилен обладает хорошей стойкостью к агрессивным жидкостям и растворителям, таким как кислоты, щелочи, алканы и некоторые органические соединения. Прочность и химическая стойкость полипропилена делают его востребованным материалом для химических резервуаров, трубопроводов, контейнеров, лабораторного оборудования и других изделий, которые будут контактировать с агрессивными средами.

В целях улучшения и получения необходимых характеристик производят модификацию полипропилена такими способами как:

- добавление усилителей и наполнителей: добавление стекловолокон, углеродных волокон, каолина и других наполнителей может улучшить прочность, жесткость и теплостойкость полипропилена;
- модификация с помощью добавок: добавление совместимых добавок, таких как стабилизаторы, антиоксиданты, смазки и другие добавки, может улучшить стойкость к воздействию ультрафиолетовых лучей, тепла, химические характеристики, механические свойства и другие;
- смешивание с другими полимерами: смешивание полипропилена с другими полимерами, такими как полистирол, полиэтилен, полиамиды, может улучшить определенные свойства, например, улучшить ударопрочность или температурные характеристики;
- модификация структуры полимера: с помощью различных технологий, таких как суспензионный или металлоценовый катализ, можно изменить молекулярную структуру полипропилена, что приведет к улучшению определенных его свойств.

Применение специальных поверхностных обработок: например, облучение ультрафиолетовыми лучами или химическое обработка поверхности может улучшить адгезию и другие характеристики.

## **5.2 Выбор метода испытания**

«Для определения прочности сварного соединения из пластмассового материала существуют разные физические методы. При выборе метода испытания всегда учитывают заданные требования, предъявляемые к сварным соединениям, условия эксплуатации изделий со сваркой и имеющиеся в испытательной лаборатории возможности для проведения испытаний.

Достаточно часто применяют испытание на растяжение. Образцы сварных соединений обычно испытываются, если это возможно, при тех же условиях (температура, влажность, скорость растяжения), что и стандартизованные образцы свариваемого материала. Вид сварного шва и характер разрушения показателен и дает интересную информацию о способности полученного сварного соединения к пластической деформации и о качестве сварки.

Нас интересует количественный метод оценки сварного соединения и оценка зависимости прочности сварного шва от времени сварки. Был выбран метод механических испытаний на растяжение, на основании которого была разработана методика испытаний.

Для нашей методики потребовалось спроектировать и изготовить специальную оснастку (рисунок 12, 13) для фиксации плоских образцов в процессе сварки и приспособление для испытания прочности сварного соединения» [32-35].

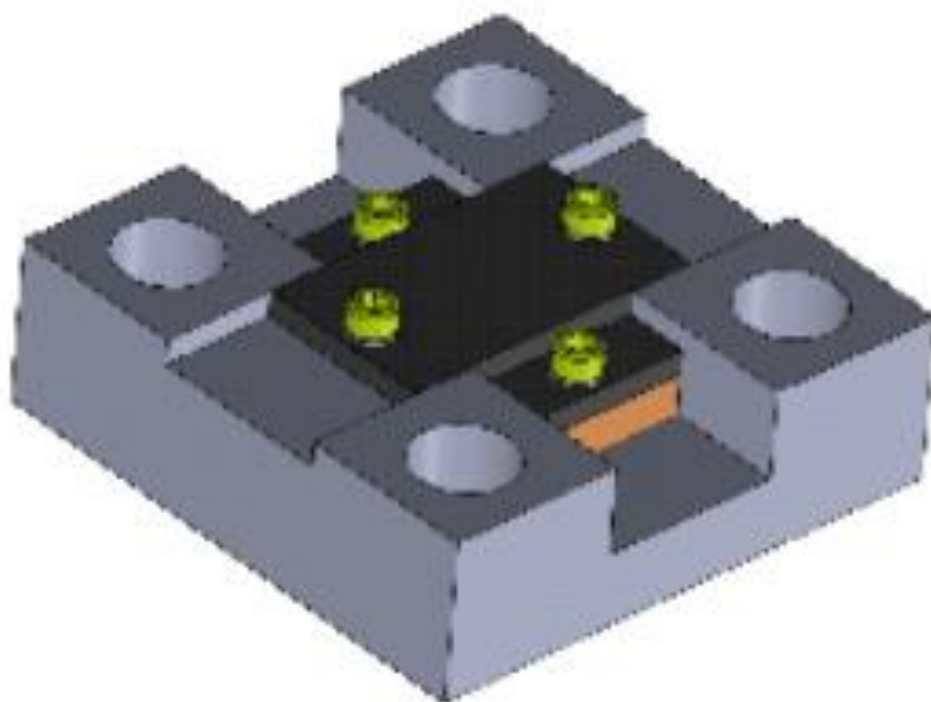


Рисунок 12 – Оснастка для фиксации плоских образцов при сварке

При помощи винтов наши заготовки попарно внахлест закреплялись на оснастке.

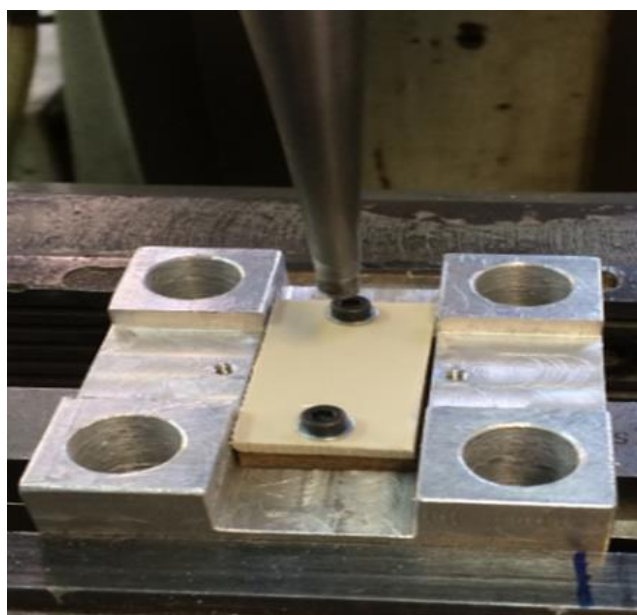
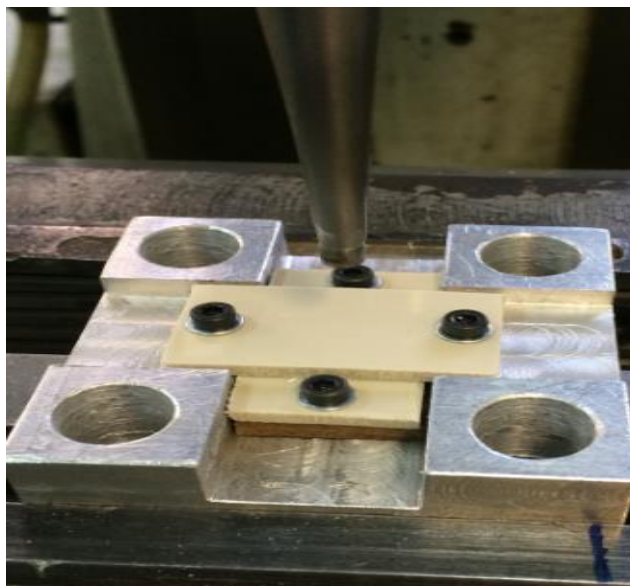


Рисунок 13 – Закрепление образца в оснастке

На рисунках 14 и 15 продемонстрировано экспериментальное приспособление, что было разработано специально для закрепления образцов таким образом, чтобы максимально приложенная нагрузка действовала именно на сварное соединение.

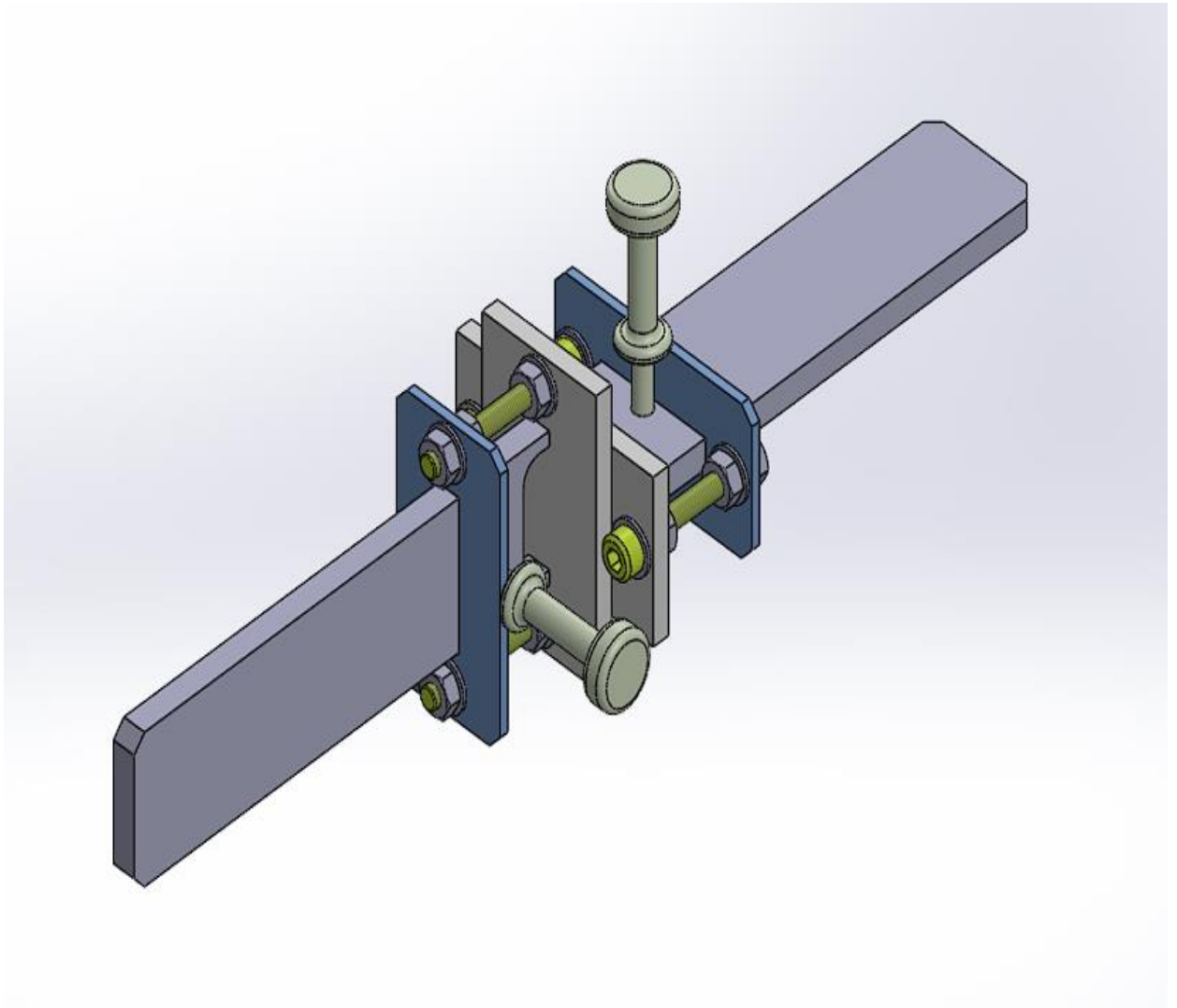


Рисунок 14 – Экспериментальное приспособление для закрепления образцов



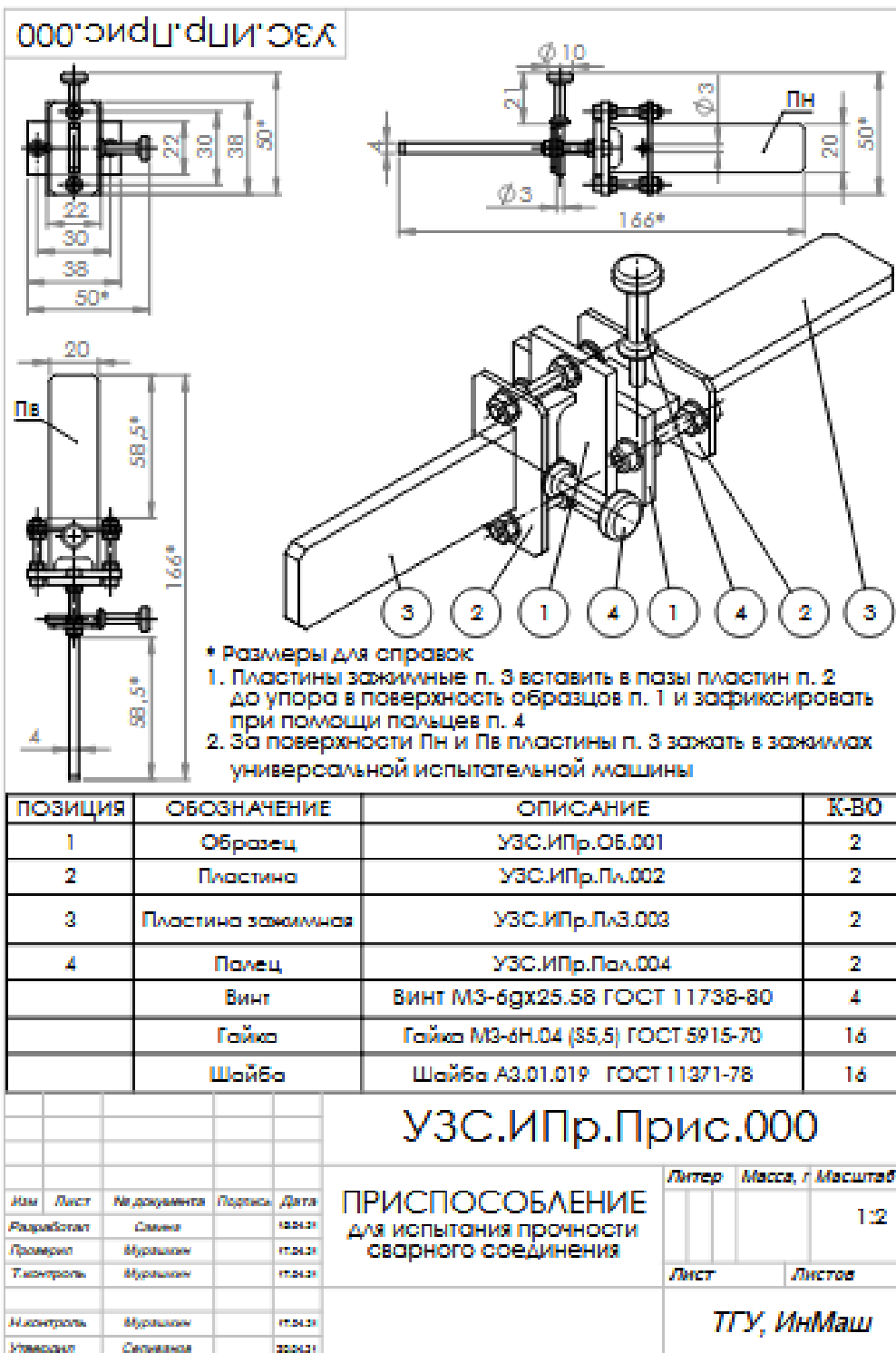


Рисунок 15 – Рабочий чертеж приспособления в сборе

В рамках нашей работы будут проводиться испытания на растяжение наших образцов на разрывной машине Zwick / Roell с целью фиксации максимального усилия на сварном соединении образцов.

### 5.3 Подготовка и изготовление образцов

Выбранные в рамках научной работы образцы были изготовлены полипропиленового пластика марки Бален. Согласно эскизу (рисунок 16), установленная толщина заготовок равна 3мм. Согласованное количество заготовок плоской формы – 120шт.

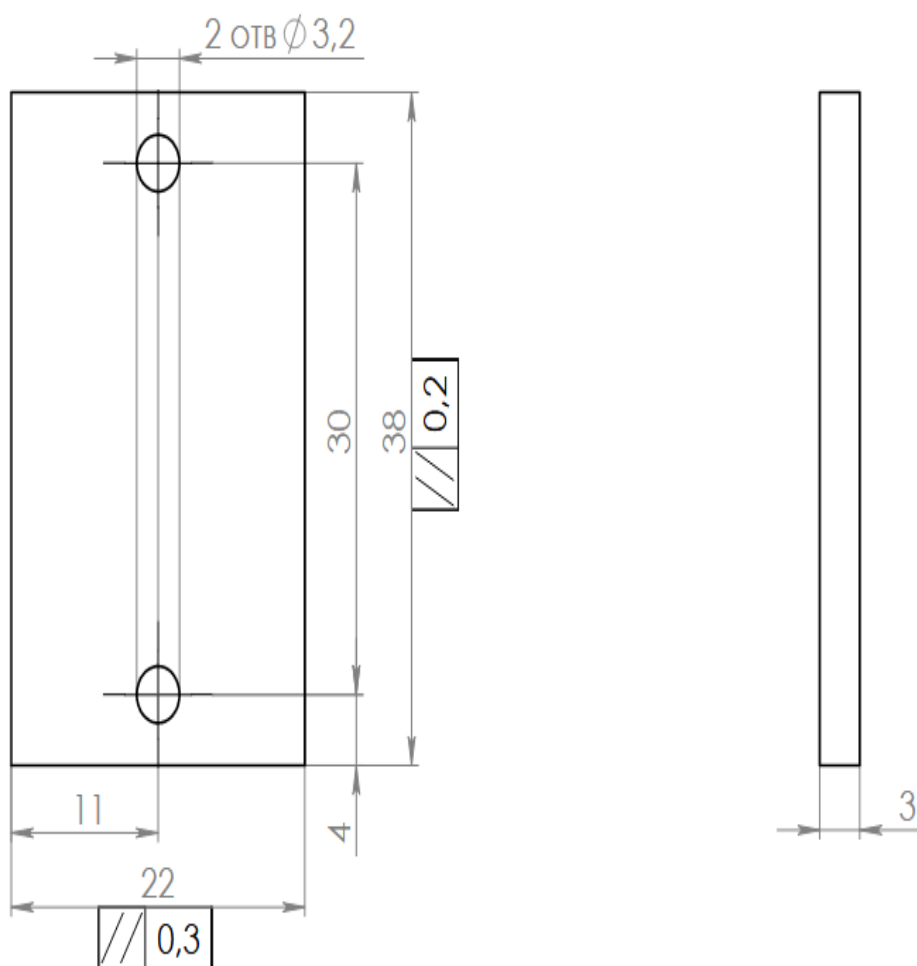


Рисунок 16 –Заготовка из пластика для испытаний

При проведении работ был использован лобзик автоматического типа для нарезки заготовок из листа полипропиленового пластика.

Образцы сваривались попарно внахлест с использованием различных типов насадок для УЗС (рисунок 17). Время сварки, как и другие характеристики не изменялись при всех сериях эксперимента – 3 с.



Рисунок 17 – Выбранные насадки различной формы для УЗС

В рамках исследования был создан рабочий стенд для проведения сварных работ с применением технологий ультразвука. Экспериментальное оборудование собрано на базе фрезерного станка с подключенным УЗ-генератором и закрепленным сварочным инструментом, а именно волноводом. Также установлено приспособление для фиксации образцов.

Экспериментальное оборудование обладает следующими характеристиками (рисунки 18-21):

- мощность – 330 Вт;
- амплитуда – 70 мкм;
- частота – 22650 Гц;
- сила прижатия – 30 Н.



Рисунок 18 – Рабочий стенд для проведения сварных работ с применением технологий ультразвука



Рисунок 19 – Сваренные образцы с использованием различных ультразвуковых насадок

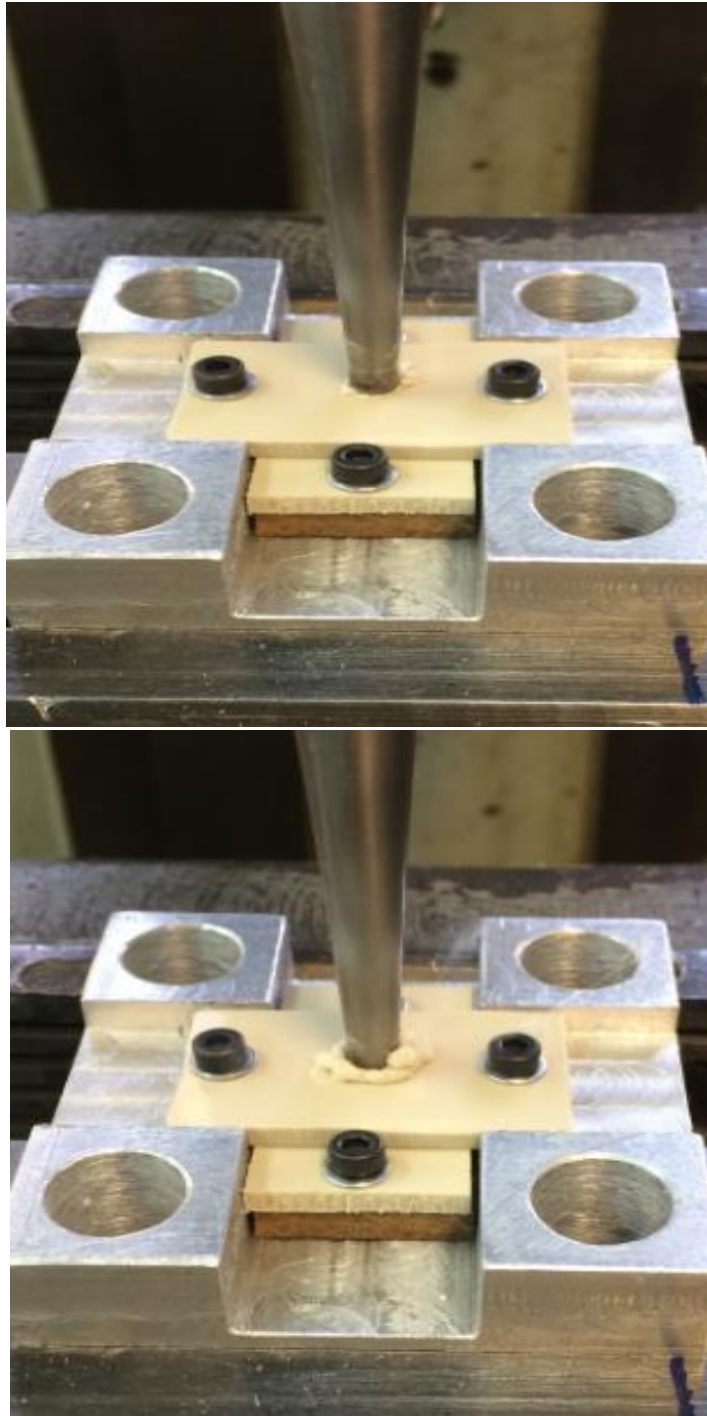


Рисунок 20 – Процесс УЗС



Рисунок 21 – Образцы сварных соединений после кондиционирования

Было изготовлено 60 образцов, чтобы были сварены попарно внахлест.

## 5.4 Оборудование для проведения испытаний

Испытания на растяжение наших образцов проводились на базе АО АВТОВАЗ с использованием испытательного оборудования, а именно Zwick / Roell Z010 (рисунок 22). «Пределы допускаемой погрешности данной модели составляют  $\pm 0,5\%$ , что полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям к испытательной машине и нашим условиям эксперимента, а диапазон и точность измерения положения и перемещения траверсы позволяет регистрировать перемещение до пятого десятичного знака» [36-38].



Рисунок 22 – Разрывная машина Zwick / Roell

На рисунок 23 показан скриншот программного обеспечения.

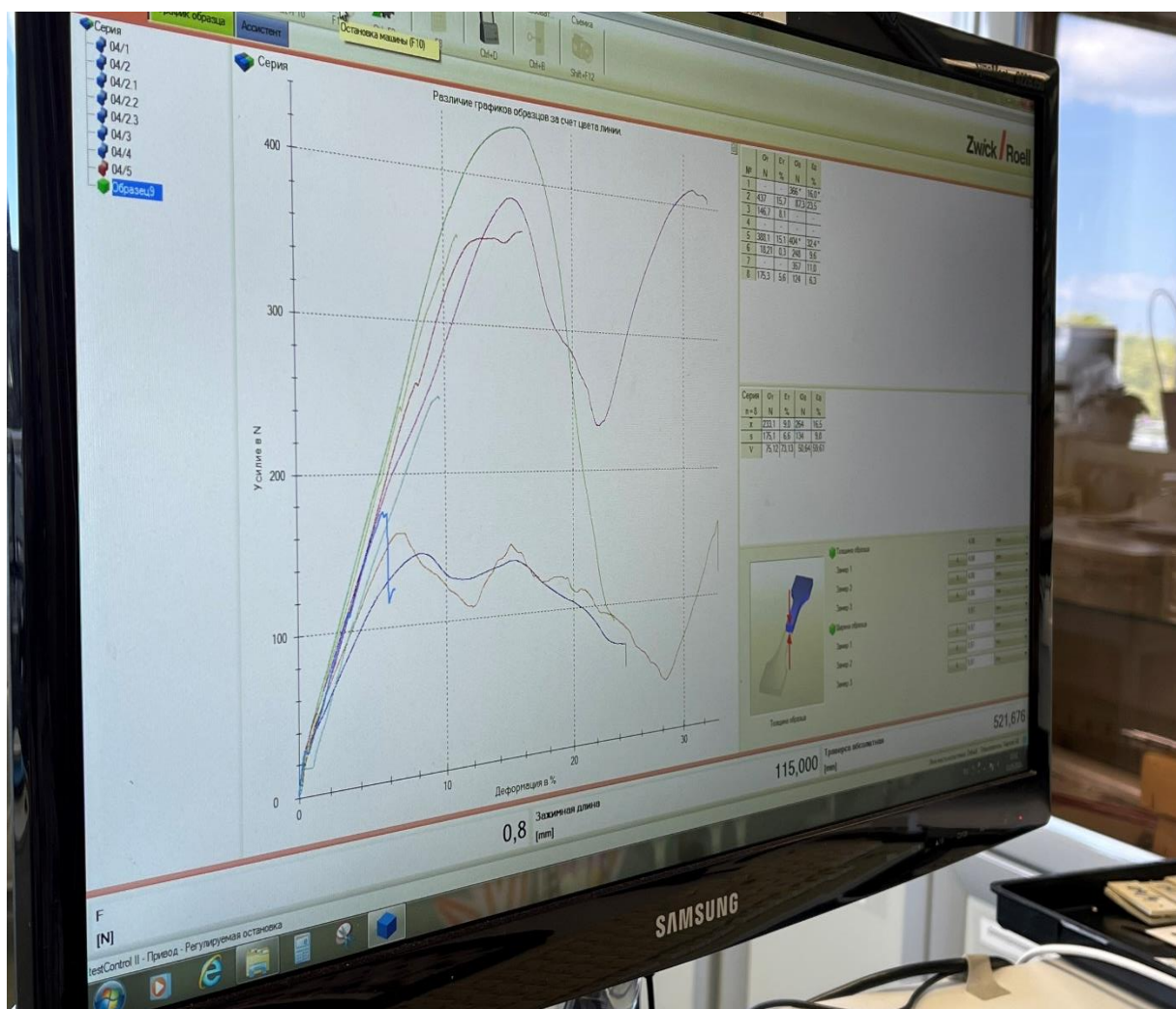


Рисунок 23 – Программное обеспечение

Блочно-модульная конструкция разрывной машины Zwick / Roell Z010 с удобным пультом управления, а также отзывчивое программное обеспечение позволяет корректно регистрировать экспериментальные данные и управлять ходом течения эксперимента.



## 5.5 Проведение испытаний

«Порядок работы на испытательной машине: перед началом работы калибруется датчик нагрузки, выставляется требуемое расстояние между подвижной и неподвижной траверсами (130 мм). Приспособление, с закрепленным в нем образцом сварного соединения, устанавливается в зажимы испытательной машины таким образом, чтобы продольная ось зажимов совпадала с продольной осью приспособления, поверхность сварного шва была перпендикулярна направлению движения подвижного зажима.

С постоянной скоростью (50мм/мин) к экспериментальным образцам прикладывается растягивающая нагрузка. С помощью специального ПО в процессе испытания фиксируются максимальное значение усилия в Н, при котором произошло разрушение образца. На протяжении всего испытания непрерывно регистрируется нагрузка и деформация образца» [39-41].

Процесс проведения испытаний на прочность (рисунок 24-25).



Рисунок 24 – Образец сварного соединения полипропилена во время испытания на растяжение

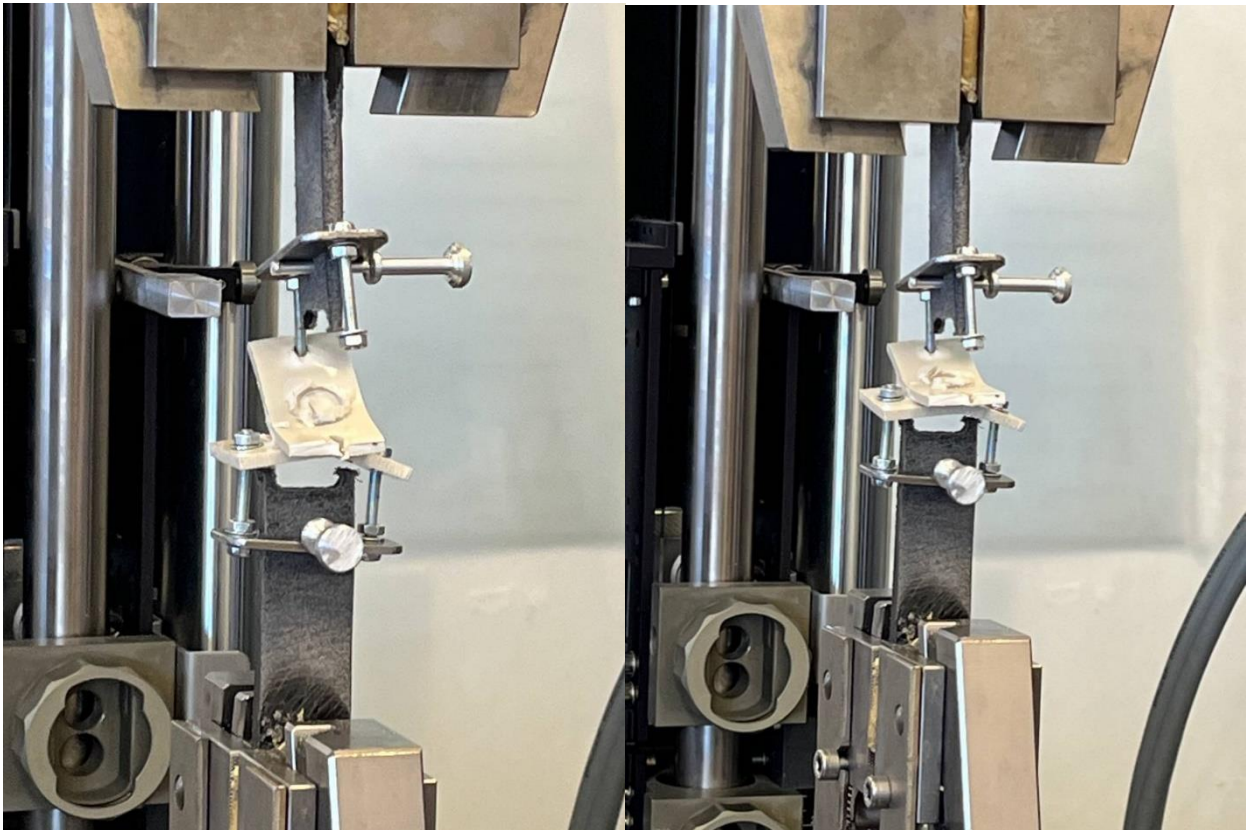


Рисунок 25 – Образцы сварного соединения полипропилена в момент разрушения

В процессе эксперимента на экран монитора выводятся результаты испытаний (рисунок 26) как в числовом виде, так и в виде диаграммы.

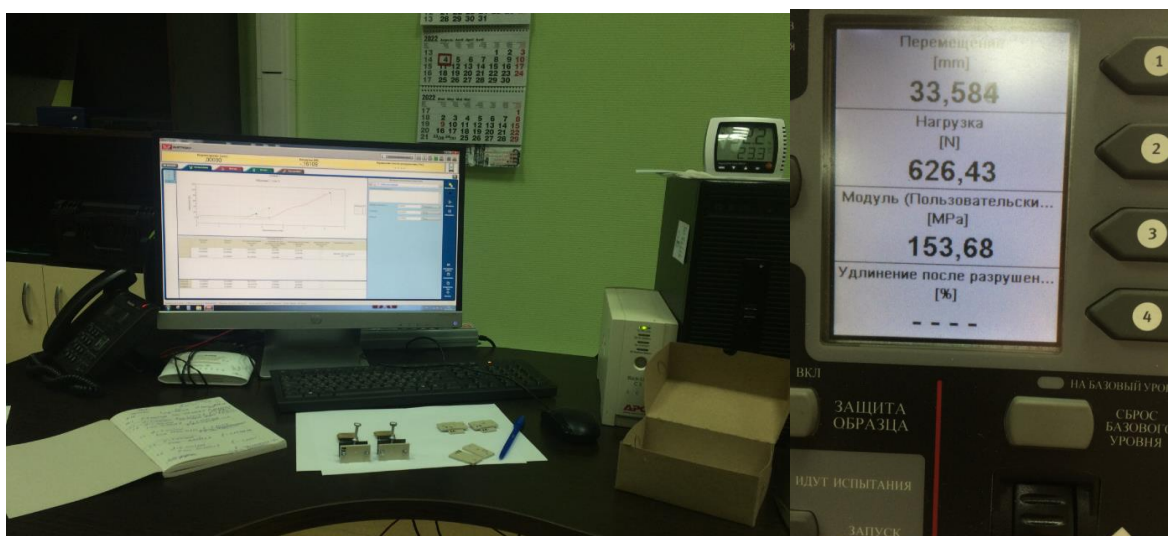


Рисунок 26 – Снятие показаний результатов испытания

В ходе экспериментального этапа работы выполнены следующие задачи:

- выбран материал для испытаний;
- разработана методика испытания;
- создан рабочий стенд для проведения сварных работ с применением технологий ультразвука;
- с помощью автоматического лобзика были изготовлены плоские заготовки в количестве 120 шт;
- выполнена ультразвуковая сварка заготовок с использованием различных насадок/форм торца сварного инструмента;
- в рамках сварочных работ изготовлено 60 образцов для испытаний;
- на базе АО АВТОВАЗ проведены испытания на прочность сварного соединения из пластика.

Получены экспериментальные результаты, которые были получены в рамках испытаний для 10 серий образцов.

## 6 Обработка экспериментальных данных

### 6.1 Представление первичных измерений

В рамках данной научной работы было изготовлено 120 образцов из полипропилена. Получены сварные соединения в количестве 60 штук.

В ходе испытаний на прочность сварного соединения образцов на испытательной машине были получены экспериментальные значения нагрузки, что регистрировалась при разрушении образца.

Предварительно отмечены самые перспективные формы насадок для ультразвуковой сварки (таблицы 2-11 и рисунки 27-36).

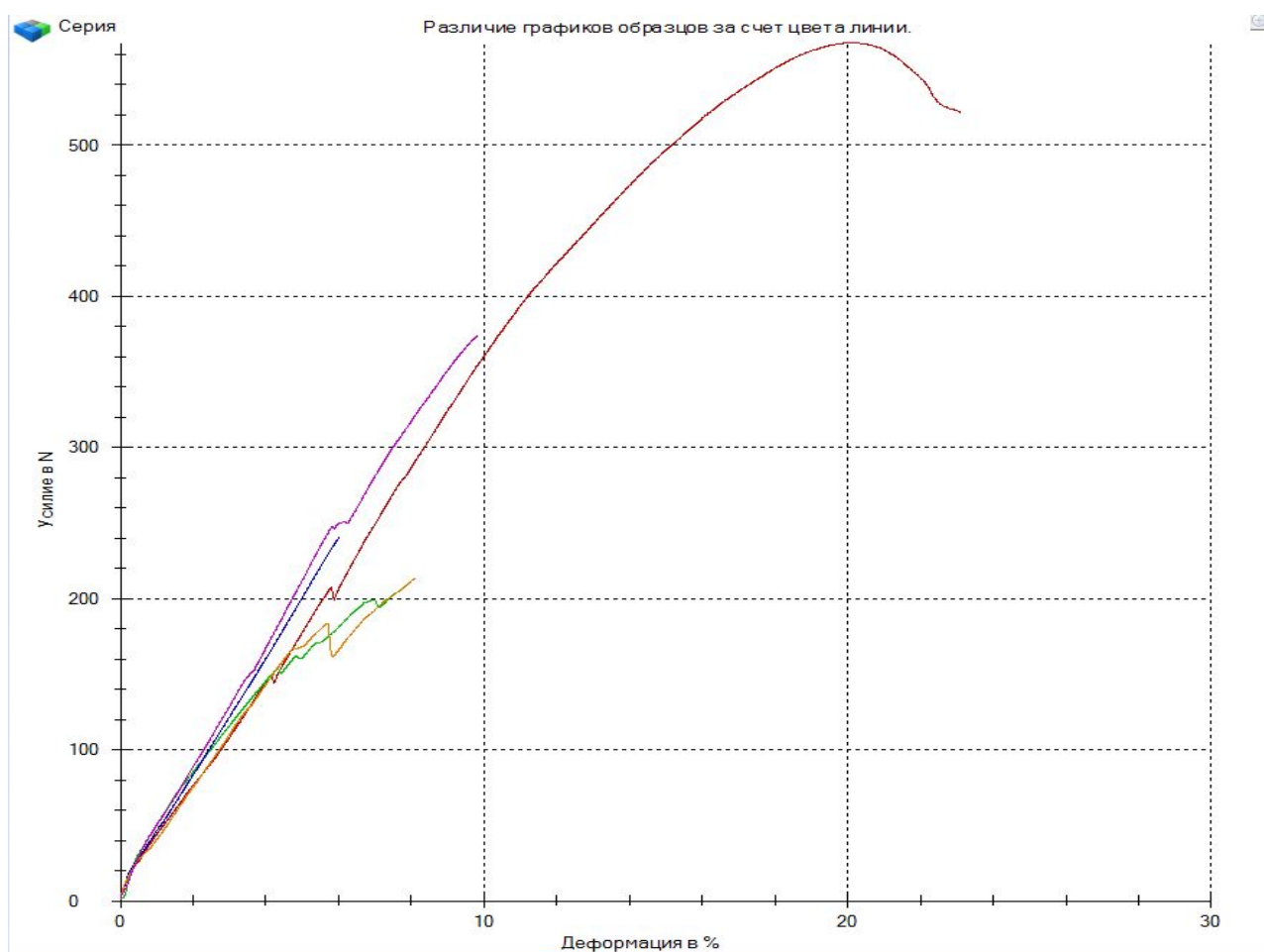


Рисунок 27 – Диаграмма «нагрузка-деформация» образцов серии № 00

Таблица 2 – Первичные результаты серии образцов № 00

№ Серии	Максимальное усилие, Н	Деформация, %	Внешний вид форм торца
1	521	23.1	
2	204	7.6	
3	240	6.0	
4	214	8.1	
5	374	9.9	

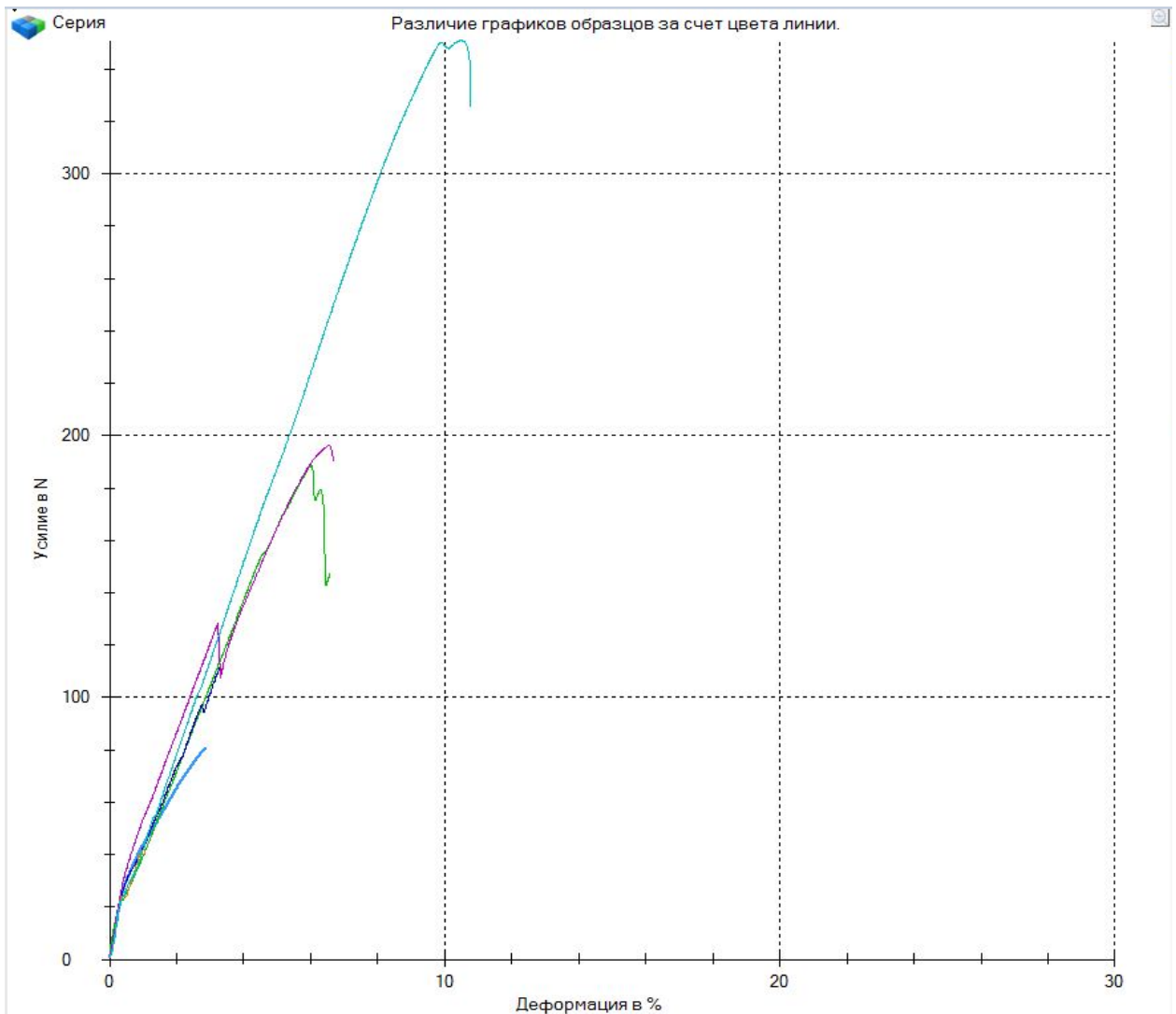
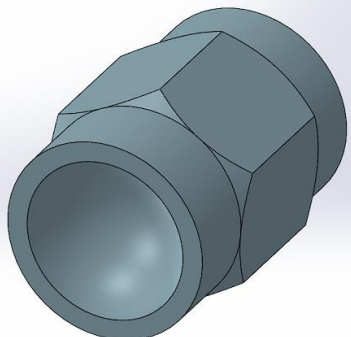


Рисунок 28 – Диаграмма «нагрузка-деформация» образцов серии № 01

Таблица 3 – Первичные результаты серии образцов № 01

№ Серии	Максимальное усилие, Н	Деформация, %	Внешний вид форм торца
1	81	2.9	
2	147	6.6	
3	113	3.3	
4	42	1.1	
5	190	6.7	
6	325	10.8	

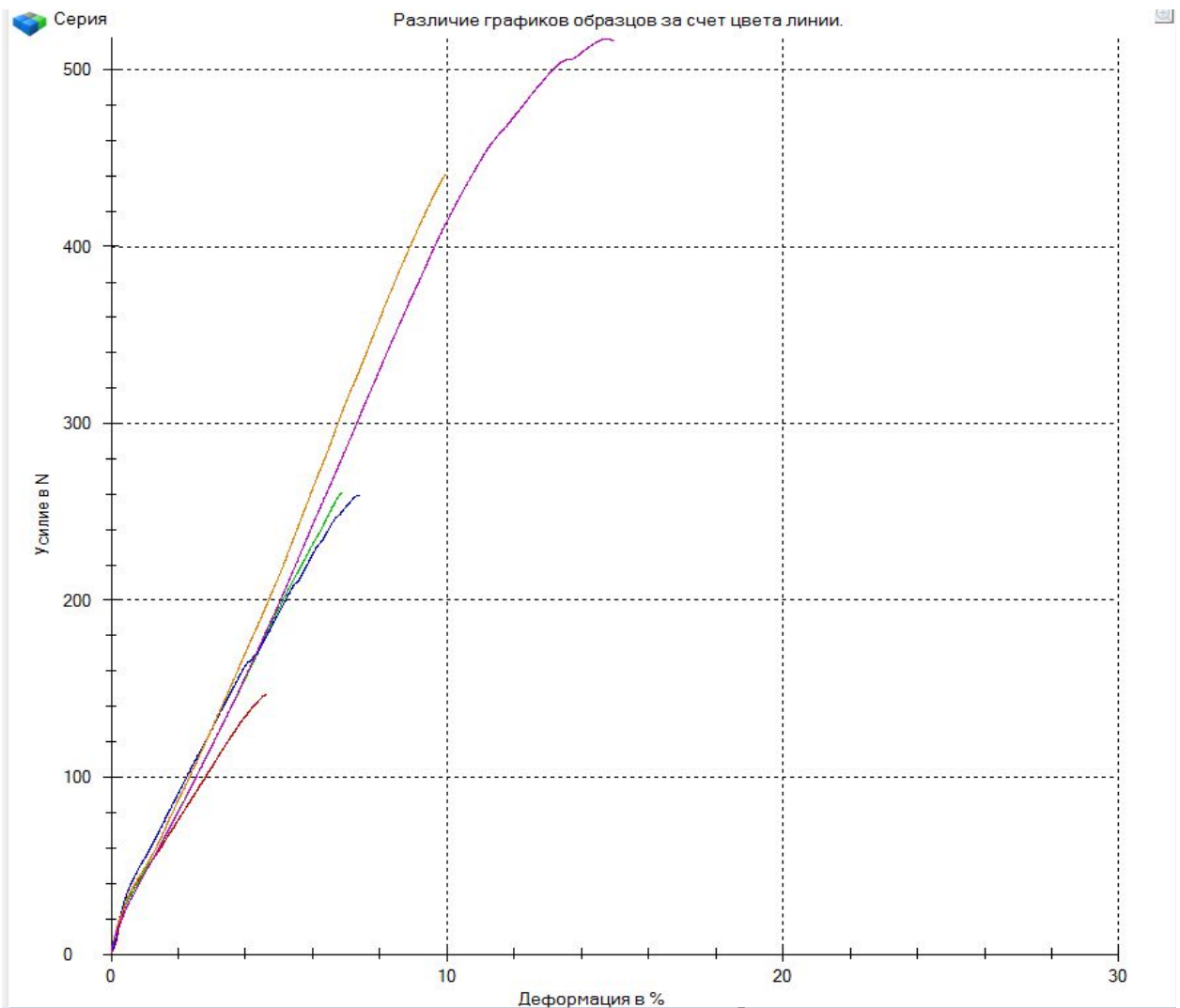
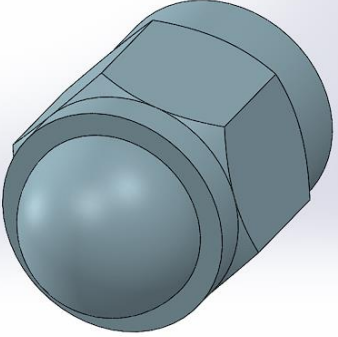


Рисунок 29 – График «нагрузка-деформация» образцов серии № 02

Таблица 4 – Первичные результаты серии образцов № 02

№ Серии	Максимальное усилие, Н	Деформация, %	Внешний вид форм торца
1	146	4.2	
2	261	6.0	
3	259	7.4	
4	441	10.0	
5	516	15.0	
6	324	9.1	

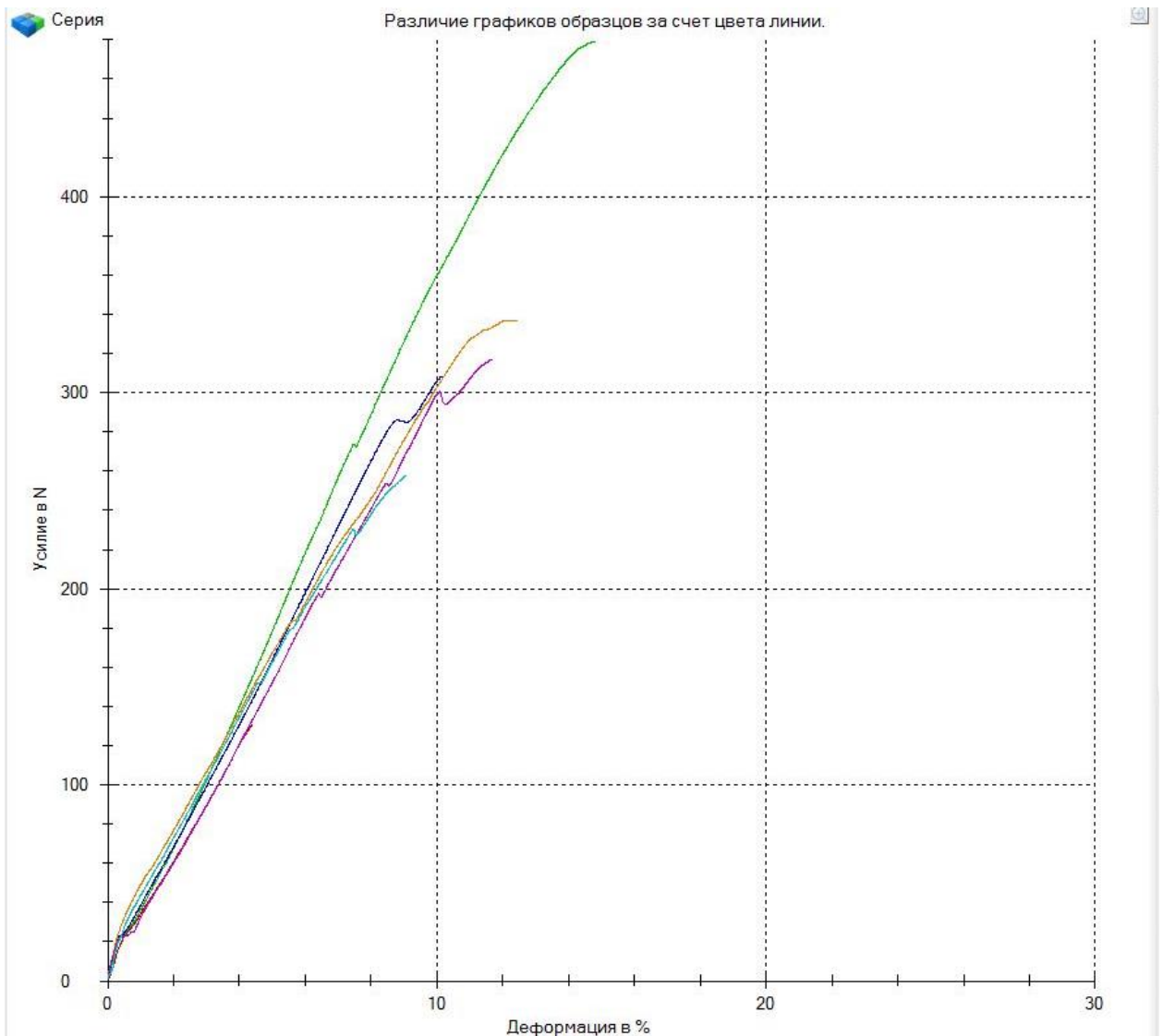
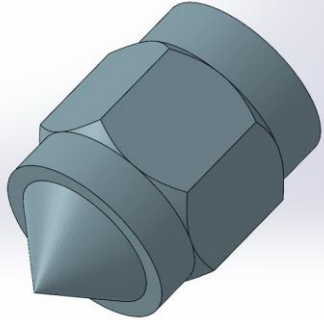


Рисунок 30 – График «нагрузка-деформация» образцов серии № 03

Таблица 5 – Первичные результаты серии образцов № 03

№ Серии	Максимальное усилие, Н	Деформация, %	Внешний вид форм торца
1	131	4.4	
2	479	14.8	
3	308	10.2	
4	337	12.5	
5	316	11.7	
6	258	9.1	

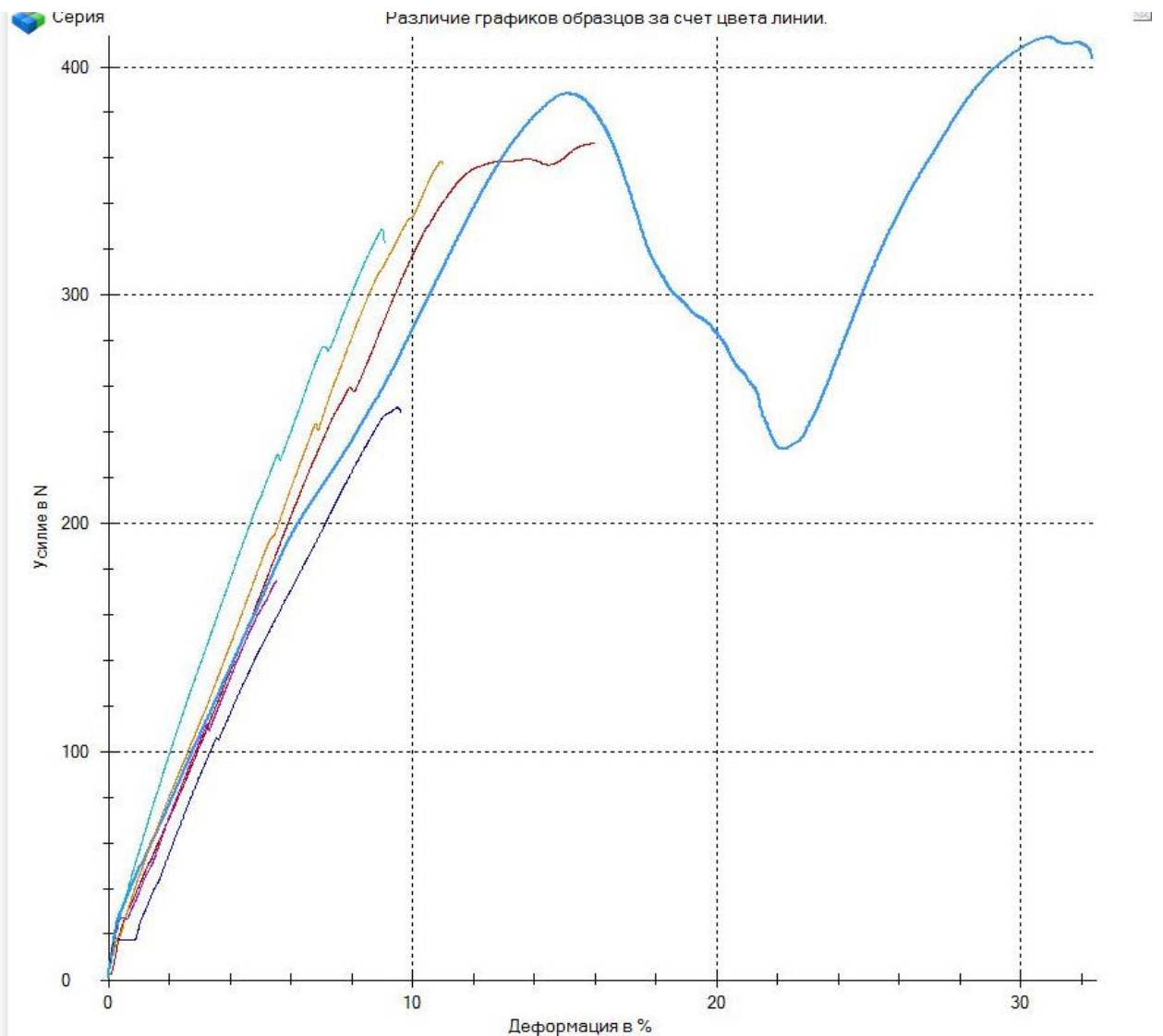
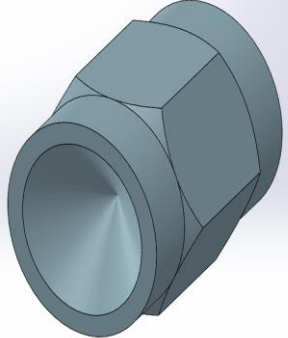


Рисунок 31 – График «нагрузка-деформация» образцов серии № 04



Таблица 6 – Первичные результаты серии образцов № 04

№ Серии	Максимальное усилие, Н	Деформация, %	Внешний вид форм торца
1	366	16.0	
2	404	32.4	
3	248	9.6	
4	357	11.0	
5	175	5.6	
6	322	9.1	

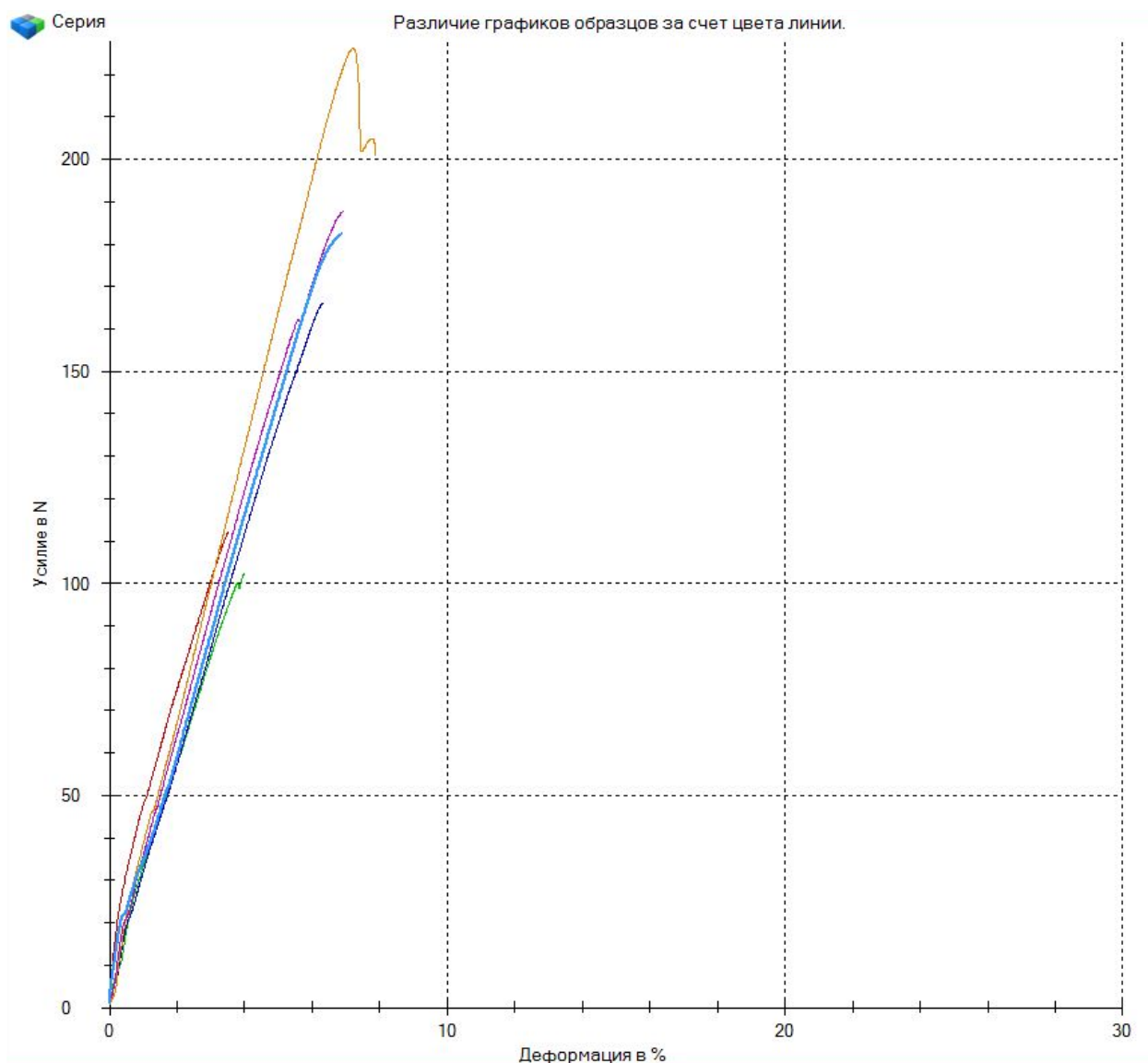
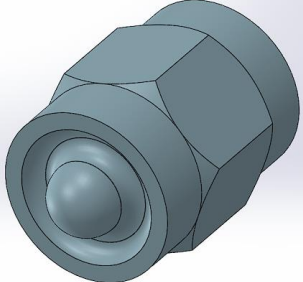


Рисунок 32 – График «нагрузка-деформация» образцов серии № 05

Таблица 7 – Первичные результаты серии образцов № 05

№ Серии	Максимальное усилие, Н	Деформация, %	Внешний вид форм торца
1	112	3.5	
2	103	4.0	
3	166	6.3	
4	182	6.9	
5	188	7.0	
6	182	6.9	

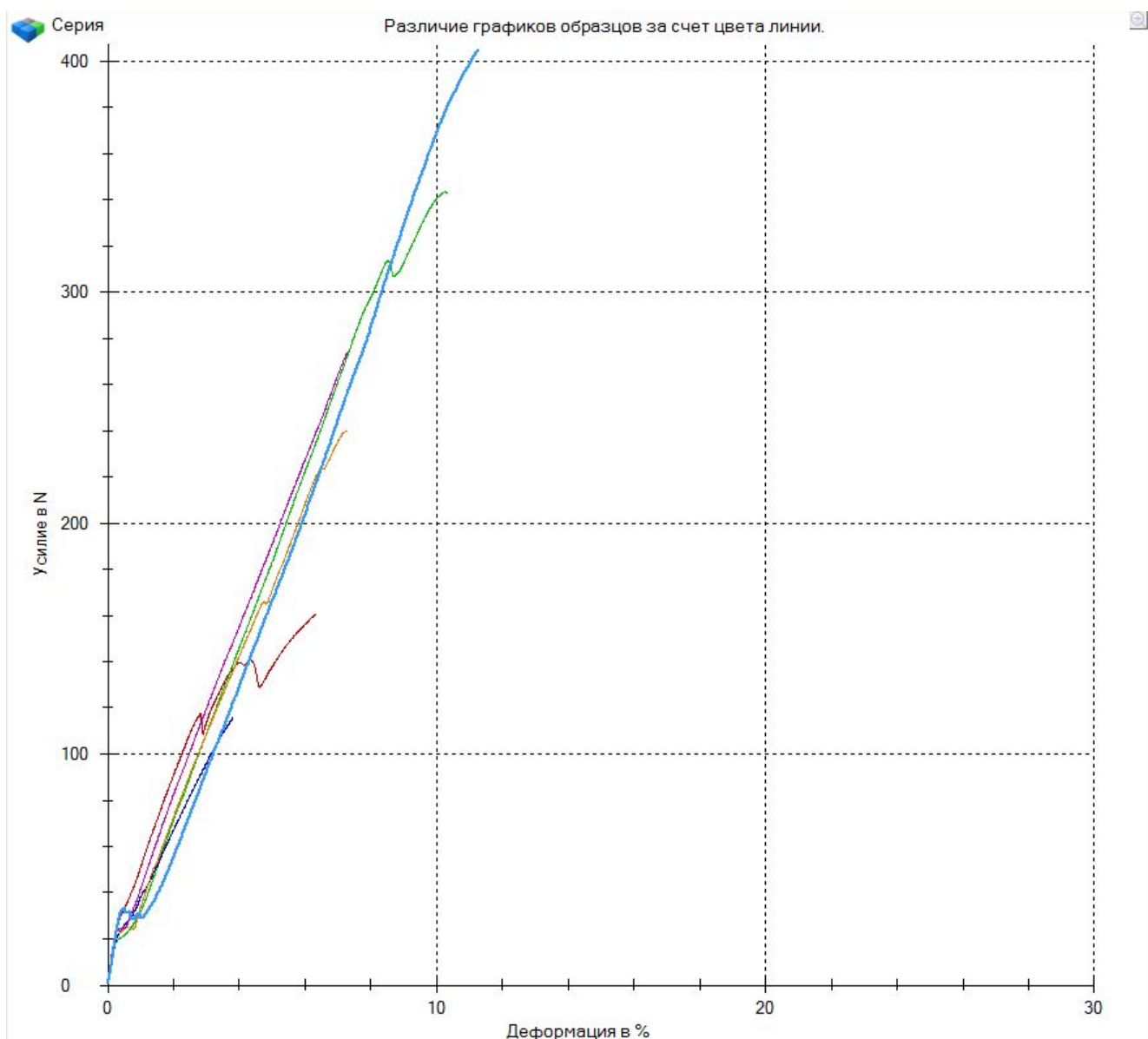
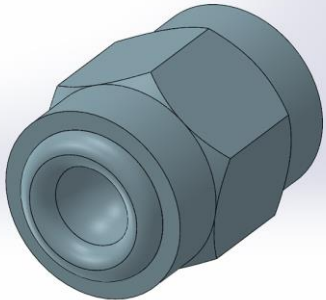


Рисунок 33 – График «нагрузка-деформация» образцов серии № 06

Таблица 8 – Первичные результаты серии образцов № 06

№ Серии	Максимальное усилие, Н	Деформация, %	Внешний вид форм торца
1	161	6.3	
2	343	10.3	
3	116	3.8	
4	240	7.3	
5	275	7.3	
6	405	11.3	

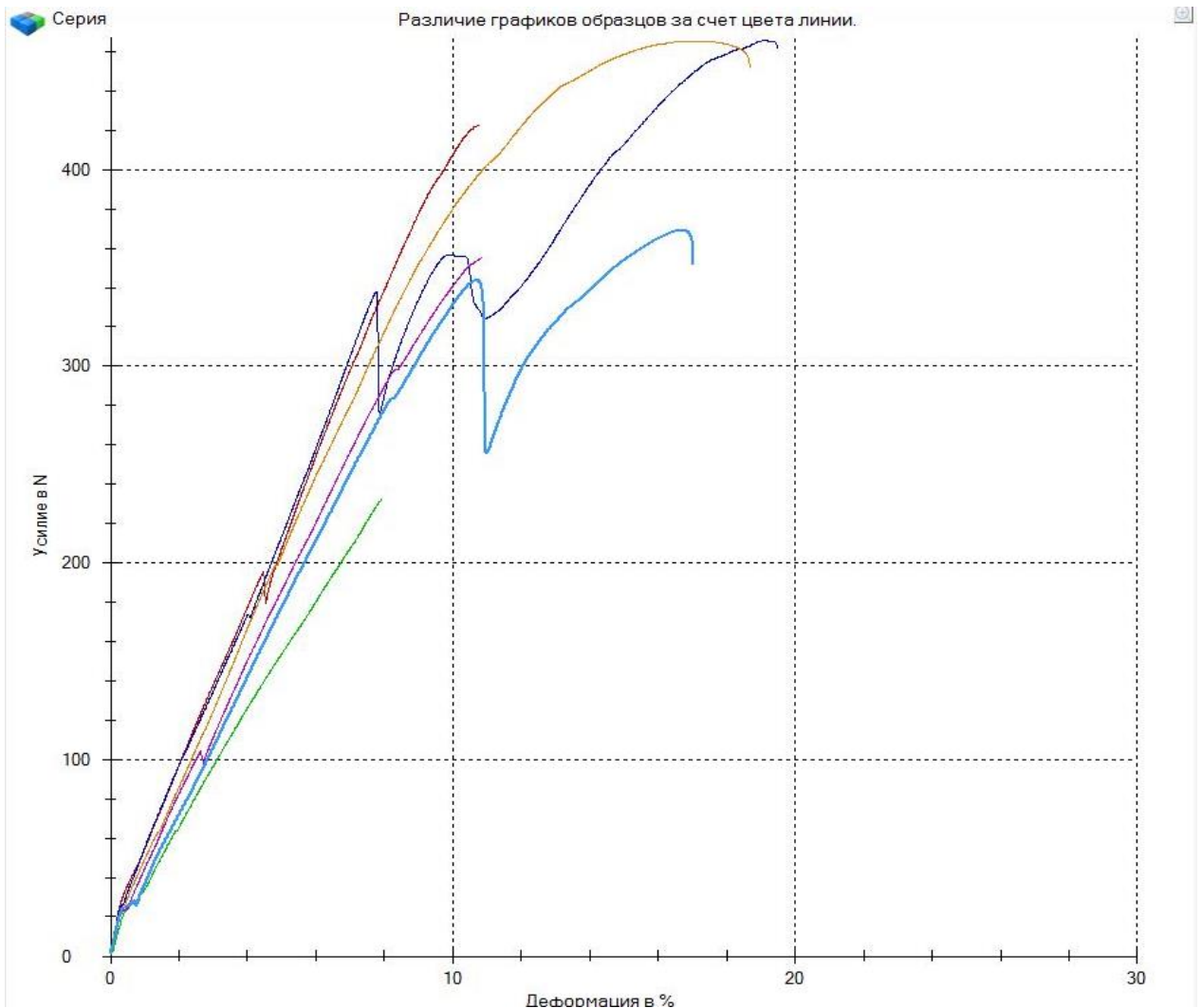
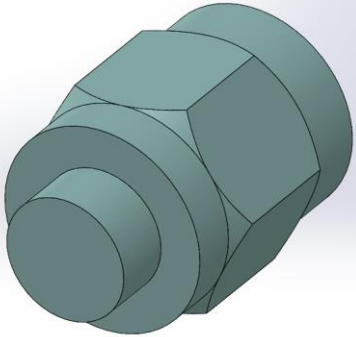


Рисунок 34 – График «нагрузка-деформация» образцов серии № 07

Таблица 9 – Первичные результаты серии образцов № 07

№ Серии	Максимальное усилие, Н	Деформация, %	Внешний вид форм торца
1	422	10.8	
2	232	7.9	
3	461	19.5	
4	452	18.7	
5	355	10.9	
6		17.0	
	352		

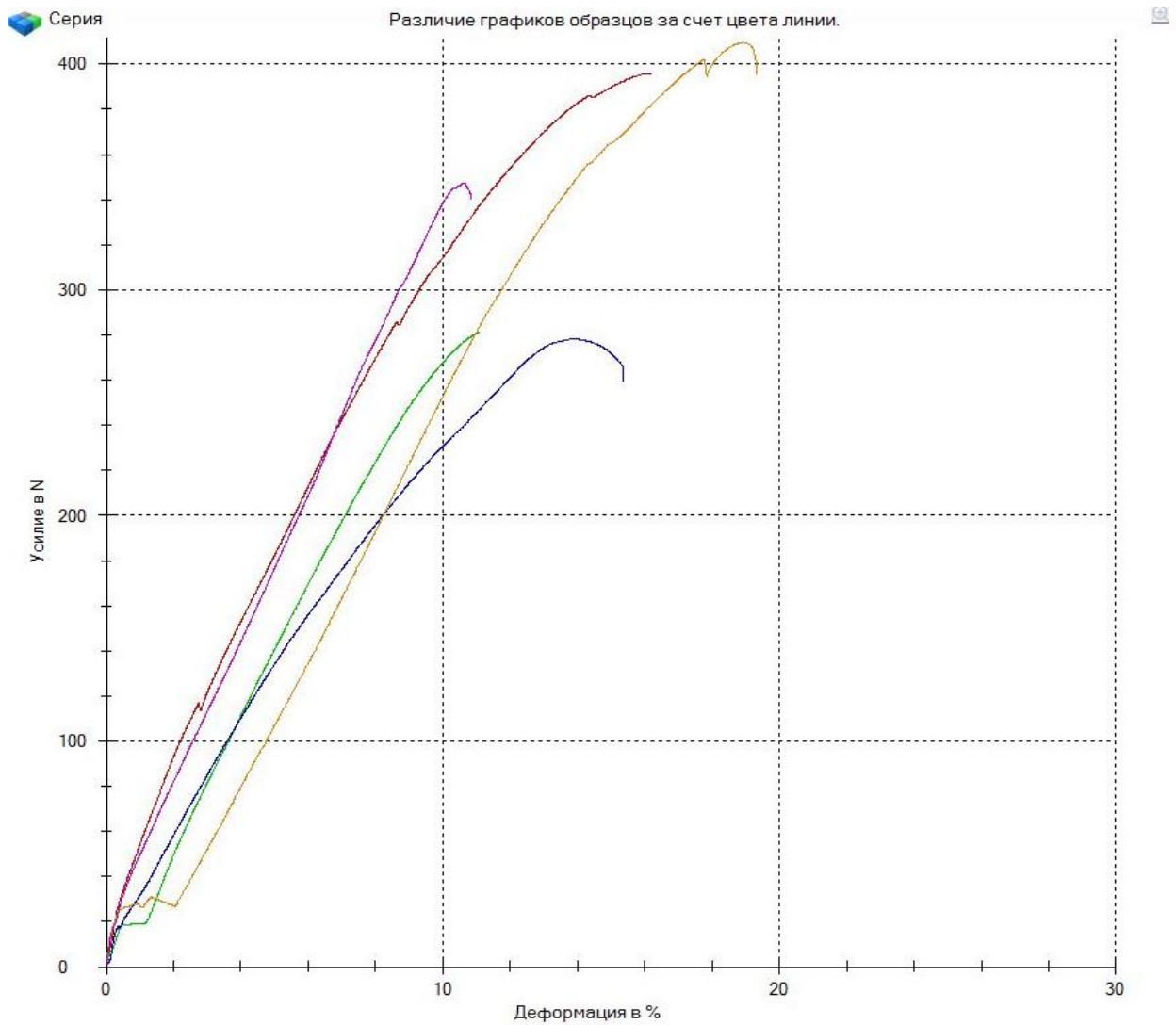


Рисунок 35 – График «нагрузка-деформация» образцов серии № 08

Таблица 10 – Первичные результаты серии образцов № 08

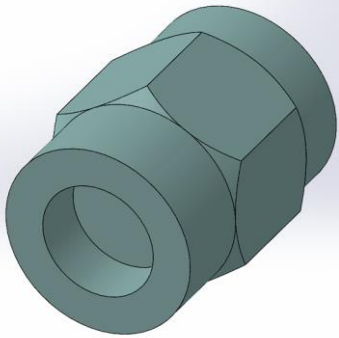
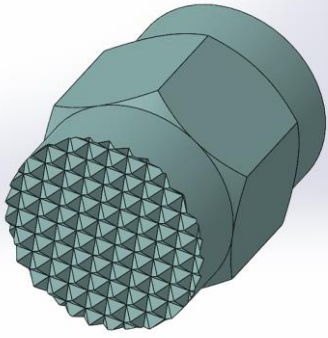
№ Серии	Максимальное усилие, Н	Деформация, %	Внешний вид форм торца
1	396	16.2	
2	281	11.1	
3	259	15.4	
4	395	19.3	
5	340	10.9	
6	338	11.0	

Таблица 11 – Результаты испытаний образцов серии № 09

№ Серии	Максимальное усилие, Н	Деформация, %	Внешний вид форм торца
1	259	9.7	
2	444	18.1	
3	309	10.9	
4	360	12.4	
5	186	11.1	
6	315	17.0	

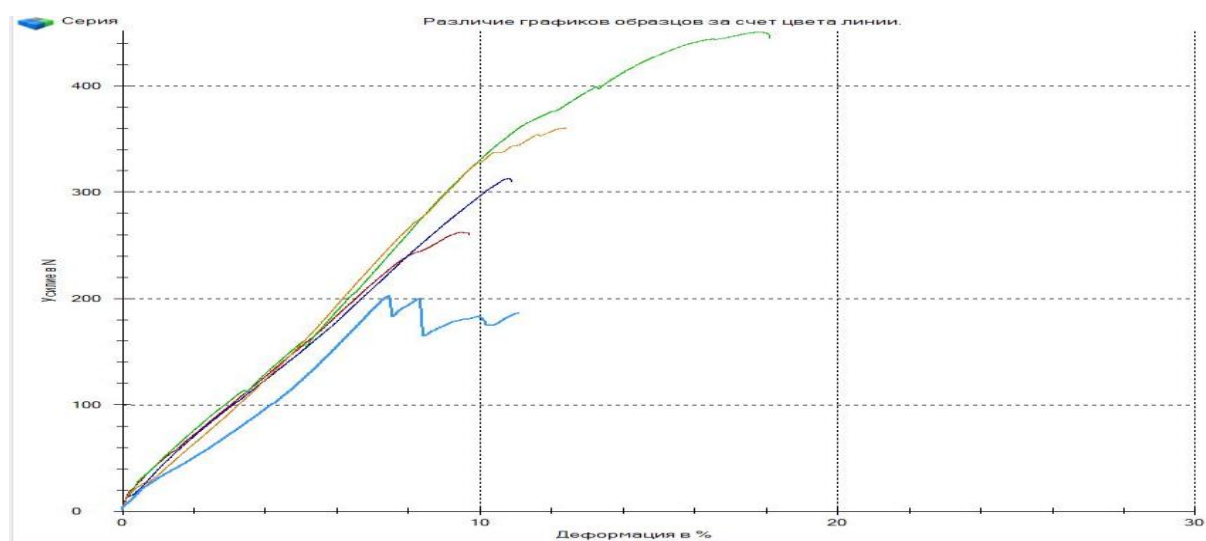
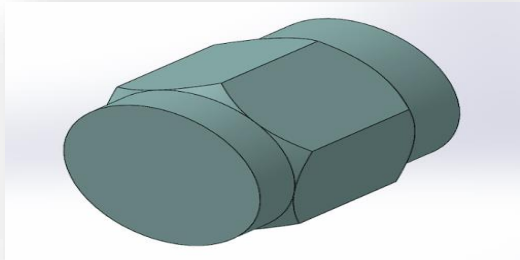
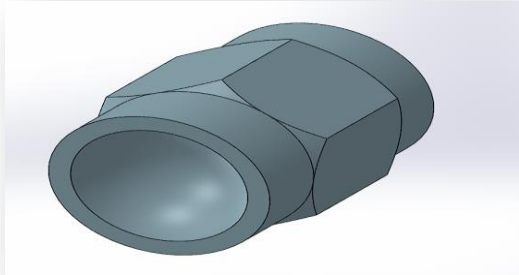
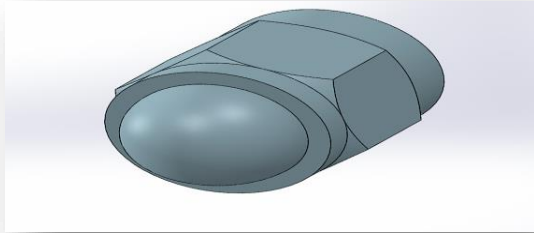
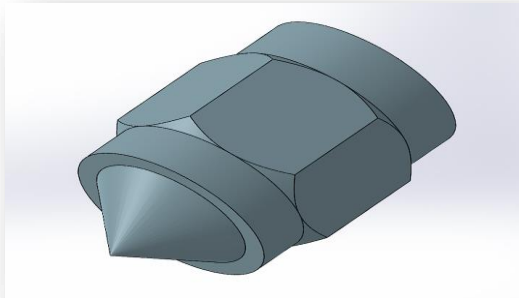
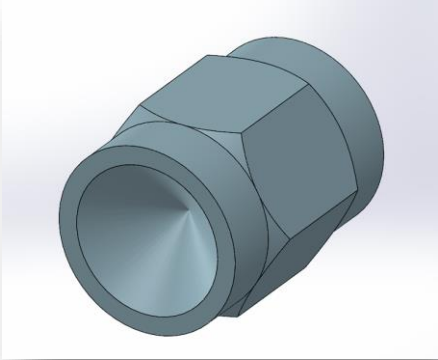
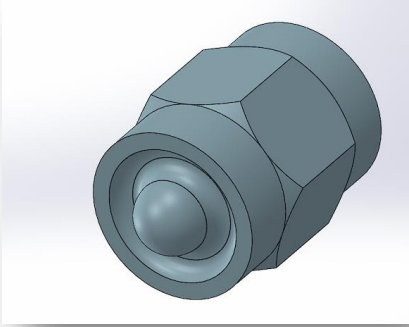
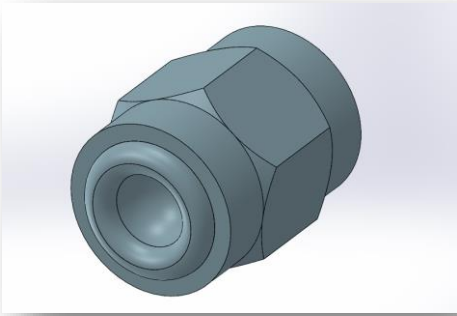
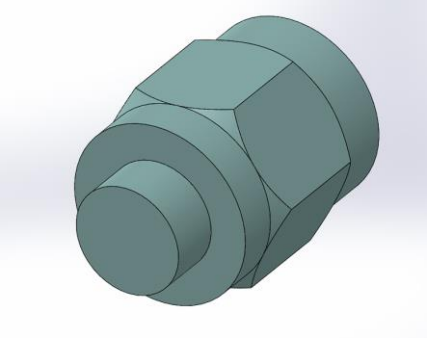


Рисунок 36 – График «нагрузка-деформация» образцов серии № 09

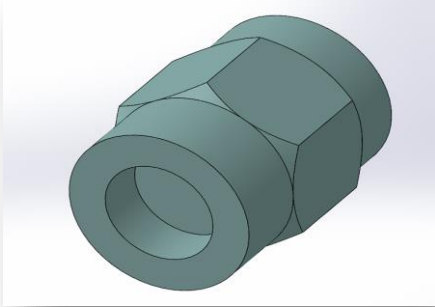
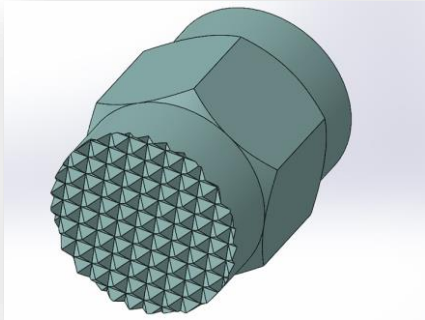
Таблица 12 – Сборные результаты сварных образцов полипропилена

№ Серии	Максимальное усилие, Н	Внешний вид форм торца
0.1	521	
0.2	204	
0.3	240	
0.4	214	
0.5	374	
0.6	258	
1.1	81	
1.2	147	
1.3	113	
1.4	42	
1.5	190	
1.6	325	
2.1	146	
2.2	261	
2.3	259	
2.4	441	
2.5	516	
2.6	324	
3.1	131	
3.2	479	
3.3	308	
3.4	337	
3.5	316	
3.6	258	

Продолжение таблицы 12

4.1	366	
4.2	404	
4.3	248	
4.4	357	
4.5	175	
4.6	322	
5.1	112	
5.2	103	
5.3	166	
5.4	182	
5.5	188	
5.6	182	
6.1	161	
6.2	343	
6.3	116	
6.4	240	
6.5	275	
6.6	405	
7.1	422	
7.2	232	
7.3	461	
7.4	452	
7.5	355	
7.6	352	

Продолжение таблицы 12

8.1	396	
8.2	281	
8.3	259	
8.4	395	
8.5	340	
8.6	338	
9.1	259	
9.2	444	
9.3	309	
9.4	360	
9.5	186	
9.6	315	

В таблице 12 подробно представлены и сгруппированы экспериментальные данные, полученные в ходе испытаний.

## 6.2 Статистическая обработка результатов серий измерений

«Все полученные результаты испытаний были проверены на надежность методом статистической обработки по ГОСТ 14359. В каждой серии были отброшены сомнительные результаты, за которые были приняты минимальное и максимальное значения, и проведен расчет границ доверительного интервала, в котором, при заданном уровне вероятности попадания в доверительный интервал 95%, заключено искомое значение определяемого показателя. Для каждой серии было проверено, охватываются ли сомнительные значения определяемых показателей допустимыми пределами, рассчитанными без них.



Отбрасывали статистически незначимые результаты измерений, используя критерий Шовине» [42-45]. «После проверки на надежность, определяли надёжные индивидуальные значения согласно ГОСТ 14359» [46-50].

Среднее арифметическое было посчитано по формуле (1):

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{N}, \quad (1)$$

где  $x_i$  – отдельное значение определяемого показателя, N;

$N$  – количество отдельных значений, входящих в расчет.

Было определено значение стандартного отклонения (2):

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (2)$$

Далее определили величину стандартного отклонения среднего значения (3):

$$\bar{S} = \frac{S}{\sqrt{N}}. \quad (3)$$

Определили коэффициент вариации среднего значения (4):

$$Vi = \frac{\bar{S}}{\bar{X}} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где  $S$  – стандартное отклонение среднего значения, формула (5);

$X$  – среднее арифметическое значение, формула (1).

Относительную ошибку высчитали по формуле (5):

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{\bar{X}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Окончательные значения экспериментальных данных представили в таблице 13.

Таблица 13 – Окончательные значения экспериментальных данных

№ Серия	Максимальное усилие, Н
00	258
01	122.9
02	324.5
03	304.8
04	339.4
05	155.5
06	256.7
07	411.1
08	338
09	310.7

После статистической обработки наших экспериментальных данных была выяснена самая перспективная форма торца рабочего инструмента для ультразвуковой сварки – Насадка № 07, имеющая ступенчатую форму и особенность в виде цилиндрической геометрической фигуры меньшего радиуса основного кольца насадки.

Данная насадка показала максимальные значения прочности сварного соединения в рамках испытательных серий.

Первичная статистическая обработка результатов испытаний была проведена при помощи MS Excel (рисунок 37).

Серия 00		Серия 01		Серия 02		Серия 03		Серия 04	
№	Макс значение нагрузки	№	Макс значение нагрузки	№	Макс значение нагрузки	№	Макс значение нагрузки	№	Макс значение нагрузки
1	568	1	81	1	146	1	131	1	366
2	204	2	188	2	261	2	479	2	388
3	240	3	113	3	325	3	308	3	248
4	214	4	42	4	259	4	317	4	357
5	373	5	190	5	441	5	317	5	175
6	320	6	325	6	517	6	257	6	322

Серия 05		Серия 06		Серия 07		Серия 08		Серия 09	
№	Макс значение нагрузки	№	Макс значение нагрузки	№	Макс значение нагрузки	№	Макс значение нагрузки	№	Макс значение нагрузки
1	112	1	161	1	422	1	396	1	259
2	164	2	343	2	232	2	281	2	444
3	226	3	116	3	338	3	278	3	309
4	182	4	240	4	465	4	395	4	360
5	188	5	275	5	355	5	340	5	203
6	161	6	405	6	343	6	338	6	315

Среднее значение		Стандартное отклонение	
Серия 00	320	Серия 00	138,1339
Серия 01	157	Серия 01	101,2023
Серия 02	325	Серия 02	134,7686
Серия 03	305	Серия 03	113,1661
Серия 04	309	Серия 04	82,62357
Серия 05	172	Серия 05	37,56816
Серия 06	257	Серия 06	108,6364
Серия 07	359	Серия 07	80,05852
Серия 08	338	Серия 08	51,69603
Серия 09	315	Серия 09	82,92406

Серия	Критерий Шовеня	Критерий Шовеня
Серия 00	1,79656635	1,601513485
Серия 01	0,838538504	0,217382661
Серия 02	0,577941761	1,42951013
Серия 03	0,760564964	0,26134447
Серия 04	0,384892321	0,42145618
Серия 05	0,001206559	0,297237517
Серия 06	0,311257832	0,794698988
Серия 07	0,429832244	1,294899217
Серия 08	1,131397517	0,153416969
Серия 09	0,331020234	0,168738666
	1,664982371	1,365411022
Серия 00	1,3269662	0,784842552
Серия 01	0,473651496	1,588421398
Серия 02	0,011236888	0,243899931
Серия 03	0,488491751	1,212396556
Серия 04	0,861971521	0,052045262
Серия 05	1,425901238	0,201935617
Серия 06	1,53903566	1,09834949
Серия 07	0,027882467	1,156137358
Серия 08	0,28424295	1,09834949
Серия 09	0,107511582	0,038538579
	0,422682521	0
Серия 00	1,53690113	1,117818779
Серия 01	0,690858299	0,675316656
Серия 02	0,959073873	1,55560154
Серия 03	0,347702511	0,072353556
Серия 04	0,581131745	0,54286517
Серия 05	1,63740055	1,350613112
Серия 06	0,154427149	0

Серия 00		Серия 01		Серия 02		Серия 03		Серия 04	
№	Макс значение нагрузки	№	Макс значение нагрузки	№	Макс значение нагрузки	№	Макс значение нагрузки	№	Макс значение нагрузки
1	204	1	81	1	261	1	308	1	366
2	240	2	188	2	325	2	337	2	388
3	214	3	113	3	259	3	317	3	248
4	373	4	190	4	441	4	257	4	357
5	320							5	322

Серия 05		Серия 06		Серия 07		Серия 08		Серия 09	
№	Макс значение нагрузки	№	Макс значение нагрузки	№	Макс значение нагрузки	№	Макс значение нагрузки	№	Макс значение нагрузки
1	164	1	161	1	422	1	396	1	259
2	182	2	343	2	338	2	281	2	309
3	188	3	240	3	355	3	395	3	360
4	161	4	275	4	343	4	340	4	315
						5	338		

Среднее значение	
Серия 00	258
Серия 01	122,9
Серия 02	324,5
Серия 03	304,8
Серия 04	339,4
Серия 05	155,5
Серия 06	256,7
Серия 07	411,1
Серия 08	338
Серия 09	311

Рисунок 37 – Обработка результатов в MS Excel

Применение MS Excel позволяет автоматизировать процесс обработки результатов.

### 6.3 Статистический анализ экспериментальных данных

В математической среде при помощи MathCAD и Statistica проведена обработка экспериментальных данных с аппроксимацией результатов испытаний аналитической зависимостью.

Будет установлена статистическая зависимость, исходящая из цели данной научной работы, а именно, между формой торца / насадки ультразвукового инструмента и прочностью сварного соединения из пластмасс.

Для решения данной задачи требуется:

- выдвинуть критерий эффективности формы ультразвукового инструмента для каждой серии образцов в соответствии с геометрическими особенностями каждой насадки;
- установить статистическую зависимость между выбранными величинами;
- дать оценку значимости связи между совокупностями.

Необходимо обозначить то, что все статистические, а также функциональные зависимости не учитывают факторы, которые всегда оказывают влияние на течение эксперимента.

Для выражения критерия эффективности формы инструмента для ультразвуковой сварки были проведены следующие работы:

- вычислены объёмы для каждой формы в зависимости от геометрических особенностей насадки;
- посчитаны площади контакта насадки и образцов в процессе сварки;
- вычислены отдельные критерии для каждой формы торца ультразвукового инструмента.

В таблице 14 представлены значения критерия эффективности формы для каждой насадки.

Таблица 14 – Значения критерия эффективности формы торца

№ насадки	К <sub>э.ф</sub>	Чертеж формы торца
00	1.10	
01	3.25	
02	1.04	

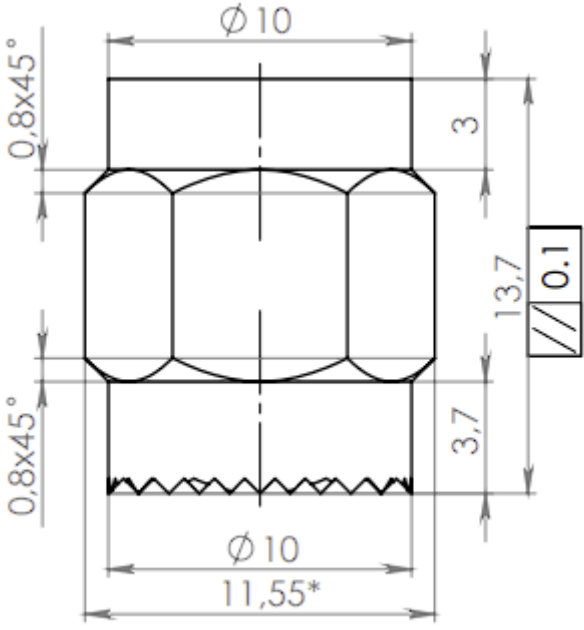
Продолжение таблицы 14

<p>03</p>	<p>1.063</p>	
<p>04</p>	<p>4.21</p>	
<p>05</p>	<p>1.15</p>	

Продолжение таблицы 14

<p>06</p>	<p>3.41</p>	
<p>07</p>	<p>0.627</p>	
<p>08</p>	<p>3.90</p>	

Продолжение таблицы 14

09	1.06	
----	------	--

Экспериментальные значения критерия эффективности формы ультразвукового инструмента:

$$K_{\text{э.ф.}} = (1.10 \ 3.25 \ 1.04 \ 1.063 \ 4.21 \ 1.15 \ 3.41 \ 0.627 \ 3.90 \ 1.06)$$

Средние значения значения максимального усилия, Н:

$$F = (258 \ 122.9 \ 324.5 \ 304.8 \ 339.4 \ 155.5 \ 266.7 \ 411.1 \ 338 \ 310.7).$$

#### 6.4 Корреляционный анализ

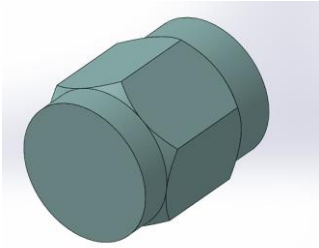
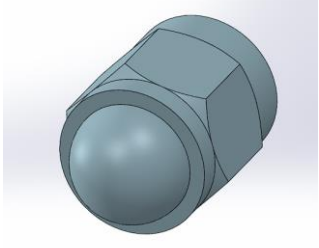
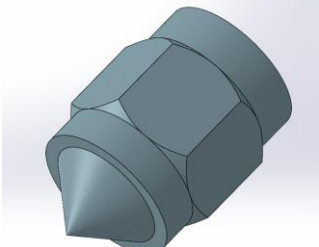
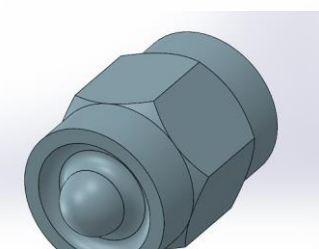
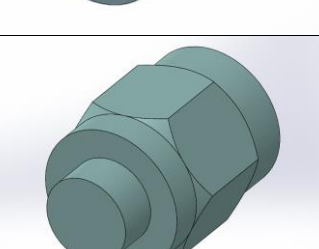
В данном подразделе проведем анализ зависимости прочности сварного соединения –  $F_f$  от критерия эффективности формы торца рабочего инструмента для УЗ сварки –  $K_f$ .

Для более корректного проведения анализа было принято решение – провести два отдельных корреляционного анализа для выпуклых и вогнутых форм отдельно.

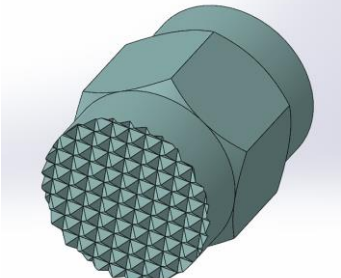


Первый этап анализа посвящен насадкам для УЗ-сварки, имеющих геометрию выпуклых фигур. На данном этапе рассматривались насадки под номерами: № 00, № 02, № 03, № 05, № 07 и № 09 (рисунок 15).

Таблица 15 – насадки для УЗ-сварки, имеющие геометрию вогнутых фигур

№ Формы	Критерий эффективности	Форма торца
00	1.10	
02	1.04	
03	1.063	
05	1.15	
07	0.627	

Продолжение таблицы 15

09	1.06	
----	------	---

На рисунке 38 изображена диаграмма рассеяния экспериментальных точек для выпуклых насадок.

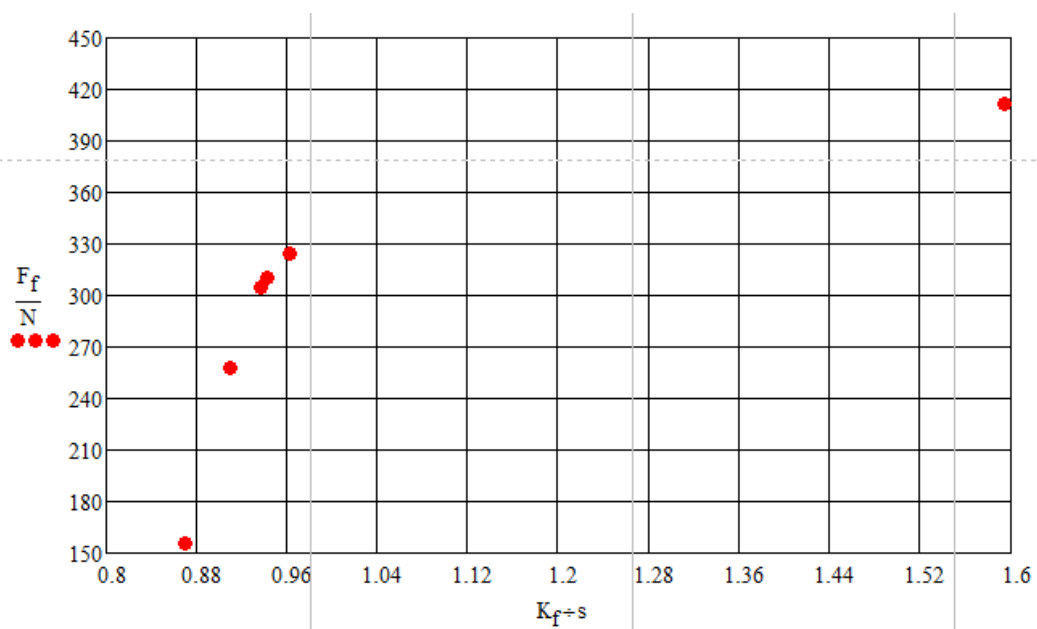


Рисунок 38 – Диаграмма рассеяния точек для выпуклых насадок

Исходя из данных диаграммы можно сделать вывод о том, что между выбранными величинами видна связь. При помощи встроенной функции Mathcad мы вычислим линейный коэффициент корреляции Пирсона, который определит значимость данной взаимосвязи (6):

$$r = \text{corr}(Kf, Ff) = 0.759. \quad (6)$$

Далее вычислим значение расчётного коэффициента Стьюдента  $t_r$  для проверки статистической значимости коэффициента корреляции Пирсона (7):

$$tr = r * \frac{\sqrt{6 - 2}}{\sqrt{1 - r^2}} = 2.329, \quad (7)$$

Полученное значение  $tr$  сравниваем с критическим значением  $t_{\text{крит}}$  – табличное значение (8):

$$t_{\text{крит}} = 1.943. \quad (8)$$

Значение нашего расчетного коэффициента Стьюдента превосходит критическое значение, что говорит о значимой статической корреляции.

Также мы определяем коэффициент детерминации  $R_1$  для нашей парной линейной регрессии. Данный коэффициент объясняет, насколько изменения в  $Y$  объясняются изменением в  $X$ .

$$R_1 = r^2 = 0.759^2 * 100 = 57.60\%. \quad (9)$$

Значение  $R = 57.6\%$  показывает нам, что более чем на 57.6% изменение формы торца рабочего инструмента для УЗС влияет на значение прочности сварного соединения из полипропилена.

При помощи Шкалы Чеддока (таблица 16) для оценки тесноты связи можем сделать вывод о том, что между формой инструмента для УЗ сварки и прочностью сварного соединения из пластмасс существует положительная линейная корреляция с заметной теснотой связи.

Таблица 16 – Шкала Чеддока

<b>r</b>	<b>Сила связи</b>
0,1 – 0,3	слабая
0,3 – 0,5	умеренная
0,5 – 0,7	заметная
0,7 – 0,9	высокая
0,9 – 0,99	Весьма высокая

F-критерий Фишера вычислим для оценки значимости полученного коэффициента детерминации R, где R считается значимым, если выполняется условие (10):

$$F_p > F_{\text{крит}} \quad (10)$$

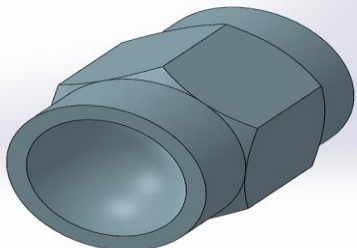
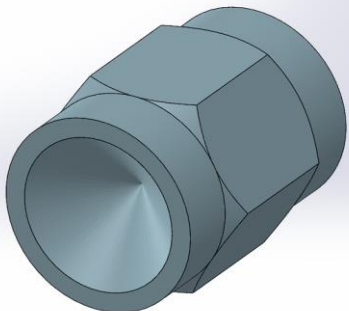
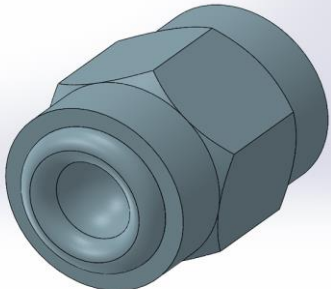
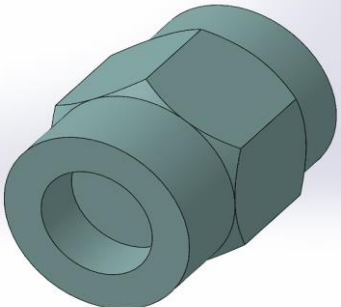
$F_{\text{крит}} = 4.54$  – значение полученное из таблицы при заданном уровне значимости  $\alpha$  и числе степеней свободы  $k_1=1$ ,  $k_2=6-2=4$  (11):

$$F_p = \frac{r^2}{1 - r^2} * (6 - 2) = 5.423 > F_{\text{крит}} = 4.54. \quad (11)$$

Была доказана значимость полученного коэффициента детерминации вследствие чего мы можем сказать, что между критерием эффективности формы торца с выпуклой геометрией рабочего инструмента и прочностью сварного соединения существует положительная линейная корреляция с заметной теснотой связи.

Второй этап анализа посвящен насадкам для УЗ-сварки, имеющих геометрию вогнутых фигур. На данном этапе рассматривались насадки под номерами: № 01, № 04, № 06, № 08 (таблица 17).

Таблица 17 – Насадки для УЗ-сварки, имеющие геометрию вогнутых фигур

№ Формы	Критерий эффективности	Форма торца
01	3.25	
04	4.21	
06	3.41	
08	3.90	

На рисунке 39 изображена диаграмма рассеяния экспериментальных точек для вогнутых насадок.

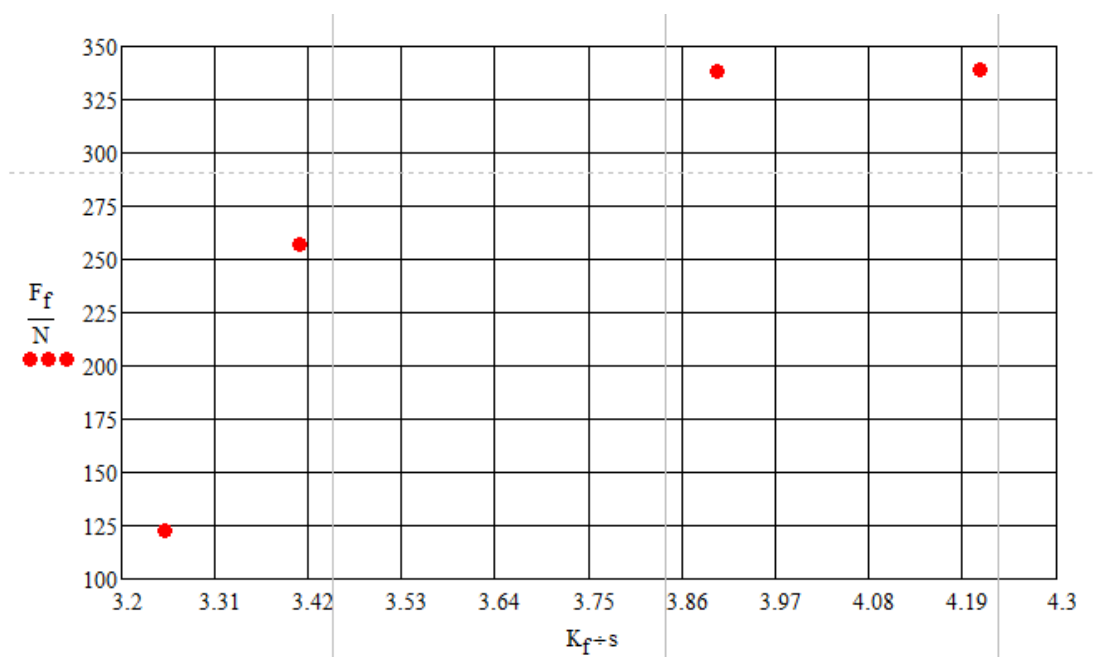


Рисунок 39 – Диаграмма рассеяния точек для вогнутых насадок

Исходя из данных диаграммы можно сделать вывод о том, что между выбранными величинами видна связь. При помощи встроенной функции Mathcad мы вычислим линейный коэффициент корреляции Пирсона, который определит значимость данной взаимосвязи (12):

$$r = \text{corr}(K_f, F_f) = 0.88. \quad (12)$$

Далее вычислим значение расчётного коэффициента Стьюдента  $t_r$  для проверки статистической значимости коэффициента корреляции Пирсона (13):

$$tr = r * \frac{\sqrt{4 - 2}}{\sqrt{1 - r^2}} = 2.618, \quad (13)$$

Полученное значение  $tr$  сравниваем с критическим значением  $t_{\text{крит}}$  – табличное значение (14):

$$t_{\text{крит}} = 2.132. \quad (14)$$

Значение нашего расчетного коэффициента Стьюдента превосходит критическое значение, что говорит о значимой статической корреляции.

Также мы определяем коэффициент детерминации  $R_1$  для нашей парной линейной регрессии. Данный коэффициент объясняет, насколько изменения в  $Y$  объясняются изменением в  $X$  (15):

$$R_1 = r^2 = 0.88^2 * 100 = 77.44\%. \quad (15)$$

Значение  $R = 77.44\%$  показывает нам, что более чем на 77.44% изменение формы торца рабочего инструмента для УЗС влияет на значение прочности сварного соединения из полипропилена.

При помощи Шкалы Чеддока (таблица 18) для оценки тесноты связи можем сделать вывод о том, что между формой инструмента для УЗ сварки и прочностью сварного соединения из пластмасс существует положительная линейная корреляция с высокой теснотой связи.

Таблица 18 – Шкала Чеддока

<b>r</b>	<b>Сила связи</b>
0,1 – 0,3	слабая
0,3 – 0,5	умеренная
0,5 – 0,7	заметная
0,7 – 0,9	высокая
0,9 – 0,99	Весьма высокая

F-критерий Фишера вычислим для оценки значимости полученного коэффициента детерминации R, где R считается значимым, если выполняется условие (16):

$$F_p > F_{\text{крит}}. \quad (16)$$

$F_{\text{крит}} = 5.53$  – значение полученное из таблицы при заданном уровне значимости  $\alpha$  и числе степеней свободы (17):

$$F_p = \frac{r^2}{1 - r^2} * (4 - 2) = 6.856 > F_{\text{крит}} = 5.53. \quad (17)$$

Была доказана значимость полученного коэффициента детерминации вследствие чего мы можем сказать, что между критерием эффективности формы торца с выпуклой геометрией рабочего инструмента и прочностью сварного соединения существует положительная линейная корреляция с высокой теснотой связи.

Исходя из цели магистерской диссертации, а именно изучить то, как форма торца рабочего инструмента влияет на прочность сварного соединения образцов из полипропилена. Было принято решение провести два независимых корреляционных анализа для каждого вида наших насадок с особой геометрией. Вследствие чего были найдены положительные линейные корреляционные зависимости между критерием эффективности формы торца рабочего инструмента для ультразвуковой сварки ( $K_{\text{э.ф.}}$ ) и прочностью сварного соединения образцов из полипропилена как с заметной (57,6 %) для выпуклых насадок, так и с высокой (77,4 %) теснотой связи для насадок с вогнутой геометрией.



## Заключение

Данная научная работа несет большой вклад в направление по изучению пластмасс и их прочностных характеристик при использовании технологий ультразвуковой сварки.

В рамках магистерской диссертации были выполнены следующие работы:

- создан рабочий стенд для проведения сварных работ с применением технологий ультразвука;
- с помощью автоматического лобзика были изготовлены плоские заготовки в количестве 120 шт;
- выполнена ультразвуковая сварка заготовок с использованием различных насадок/форм торца сварного инструмента;
- в рамках сварочных работ изготовлено 60 образцов для испытаний;
- на базе АО АВТОВАЗ проведены испытания на прочность сварного соединения из пластика с помощью испытательной машины Zwick / Roell;
- в математической среде при помощи MathCAD и проведена статистическая обработка экспериментальных данных результатов испытаний;
- установлена форма рабочего торца сварочного инструмента, при которой образуется сварное точечное соединение из полипропилена с наибольшей прочностью на растяжение;
- был проведен сравнительный анализ всех форм и выявлены факторы, влияющие на прочность сварного соединения;
- выявлена самая перспективная форма рабочего торца для ультразвуковой сварки образцов из полипропилена.

С целью оценки влияния на прочность сварного соединения был выведен критерий эффективности формы рабочего торца сварочного

инструмента. Был проведен детальный анализ для каждого вида наших насадок с особой геометрией. Вследствие чего были найдены положительные линейные корреляционные зависимости между критерием эффективности торца рабочего инструмента ( $K_{э.ф.}$ ) и прочностью сварного соединения образцов из полипропилена как с заметной, так и с высокой теснотой связи.

Предложен новый подход к изучению прочностных свойств сварного соединения пластмасс на примере полипропилена марки Бален, в части влияния формы торца рабочего инструмента для ультразвуковой сварки на прочность сварного соединения пластмасс.

Определены статистические закономерности между формой инструмента и: прочностью сварного соединения.

В рамках магистерской диссертации была подтверждена выдвигаемая гипотеза. Установлена статистическая зависимость между прочностью сварного соединения из полипропилена и формой торца рабочего инструмента для УЗС.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Балабина Г. В., Истратов И. Ф. Контроль качества сварных соединений из пластмасс в строительстве. М.: Стройиздат. 1975. 196 с.: ил.
2. Бараз В. Р. Корреляционно-регрессивный анализ связи показателей коммерческой деятельности с использованием программы Excel: учебное пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2005. 103с.
3. Бараз В. Р. Применение программы Excel для статистических расчетов в материаловедении: учебное пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. 46 с.
4. Виды пластмасс [Электронный ресурс]. URL: [https://www.autowelding.ru/publ/1/1/plastmassy\\_poluchenie\\_plastmass\\_sostav\\_svojs\\_tva\\_svarivaemost/2-1-0-349](https://www.autowelding.ru/publ/1/1/plastmassy_poluchenie_plastmass_sostav_svojs_tva_svarivaemost/2-1-0-349) (дата обращения 16.09.2021).
5. Волков С. С., Орлов Ю. Н., Астахова Р. Н., Сварка и склеивание пластмасс. М., 1972. - 398 с.
6. Волков С. С. Сварка пластмасс ультразвуком/ С. С. Волков, Ю. Н. Орлов, Б. Я. Черняк. М., Химия, 1974. 264 с.: ил.
7. Волков С. С. Сварка и склеивание пластмасс / С. С. Волков, Ю. Н. Орлов, Р. Н. Астахова. М.: Машиностроение, 1972. 128 с.: ил.
8. Волков С. С., Яматов Р. Г. Применение пластмасс в машиностроении. М. 1979. № 17 С.41-48. (Тр. МВТУ им. Н.Э.Баумана).
9. Волченко В. Н. Сварка и свариваемые материалы т.1. М. 1991.
10. ГОСТ 11262-2017 Пластмассы. Метод испытаний на растяжение. М.: Стандартиформ, 2018.
11. ГОСТ 12423-2013 Условия кондиционирования и испытания образцов (проб). М.: Стандартиформ, 2014.
12. ГОСТ 14359-1969 Методы механических испытаний. Общие требования. М.: Издательство стандартов, 1993.

13. ГОСТ 16310-80 Соединения сварные из полиэтилена, полипропилена и винипласта. Основные типы, конструктивные элементы и размеры (с Изменением N 1). М.: ИПК Издательство стандартов, 1997.
14. ГОСТ 26996-86 Полипропилен и сополимеры пропилена. Технические условия. (с изменениями №№1,2). М.: ИПК Издательство стандартов, 2022.
15. ГОСТ 32794-2014 Композиты и полимеры. М.: Стандартиформ, 2015.
16. ГОСТ Р 56911-2016/EN 12317-2:2010 Метод определения прочности на сдвиг сварного и клеевого соединений. Стандартиформ, 2019.
17. Гуль В. Е., Кулезнев В. Н. Структура и механические свойства полимеров. 3-е изд. М.: Высшая школа. 1972. 352 с.: ил.
18. Двухколонные испытательные рамы настольного типа серии 5960. Руководство оператора. M10-16247-RU Редакция В.
19. Завгородний В. К., Калинин Э. Л., Махаринский Е. Г. Оборудование предприятий по переработке пластмасс, изд. «Химия», Л., 1972, 464 с, рис. 263, табл. 34.
20. Зайцев К. И., Мацюк Л. Н. Сварка пластмасс. М.: Машиностроение, 1978. 224 с.: ил.
21. Интерпретация величин коэффициентов корреляции [Электронный ресурс]. URL: Nemphill JF. Interpreting the magnitudes of correlation coefficients. Amer Psychol. 2003;58(1):78-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1037/0003-066X.58.1.78> (дата обращения: 06.05.2022).
22. 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.
23. Клеткин И. Д., Крючков Н. В., Морева Р. Ф. Ультразвуковая сварка при изготовлении одежды. М.: Легк. Индустрия. 1979. 335 с.: ил.

24. Калинин Э. Л., Саковцева М. Б. Выбор пластмасс для изготовления и эксплуатации изделий: Справ. Изд. Л.: Химия, 1987. 416 с.
25. Контроль качества сварки / Под ред. В. Н. Волченко. М.: Машиностроение. 1975. 328 с.: ил.
26. Кулезнева В.Н. Основы физики и химии полимеров. М: Высшая школа, 1977. 247 с.
27. Лебедев Г. А. «Напыление. Сварка. Склеивание». М.: 1988.
28. Лекки Б. Сварка пластмасс: основы. [Электронный ресурс]. URL: [www.omnexus.com](http://www.omnexus.com) (дата обращения 22.04.2022).
29. Нарисава И. Прочность полимерных материалов.: М.: Химия: 1987. - 400 с.
30. Николаев Г. А., Ольшанский Н. А., Новые методы сварки металлов и пластмасс. М., 1966. 220 с.
31. Обзор мировой полимерной индустрии [Электронный ресурс]. URL: [https://polyprofi.ru/blogs/Blog\\_Poly\\_and\\_Pro/obzor-mirovoy-polimernoy-industrii.php](https://polyprofi.ru/blogs/Blog_Poly_and_Pro/obzor-mirovoy-polimernoy-industrii.php) (дата обращения: 15.07.2021).
32. Описание типа средства измерений системы для измерений параметров испытаний серии 5900. Приложение к свидетельству № 38881 об утверждении типа средства измерений.
33. Описание типа средства измерений системы для индикаторов ИЧ и ИЧЦ. Приложение к свидетельству № 62552 об утверждении типа средства измерений.
34. Описание типа средства измерений системы для штангенциркулей торговой марки «Калиброн». Приложение к свидетельству № 76278 об утверждении типа средства измерений.
35. Руководство по ультразвуковой сборке пластмасс [Электронный ресурс]. URL: Klamecki, В.Е. Guide to Ultrasonic Plastics Assembly/ В.Е. Klamecki // Dukane Part, 2011. С. 101 – 120 (дата обращения: 22.04.2022).
36. Руководство пользователя по коэффициентам корреляции [Электронный ресурс]. URL: Akoglu H. User's guide to correlation coefficients.

Turk J Emerg Med. 2018;18(3):91-3. DOI: 10.1016/j.tjem.2018.08.001 (дата обращения: 22.04.2022).

37. Савина Е. Б., Юхнович А. Ю. «Освоение и внедрение цельноформованных деталей интерьера из листового ДН полипропилена различных производителей, проведение работ по улучшению качества». - Сборник докладов участников 1-ой научно-практической конференции молодых специалистов Управления лабораторно-испытательных работ ОАО «АВТОВАЗ». 2003г.

38. Савина Е. Б., Мурашкин С. В. «Исследование причины появления дефекта внешнего вида на пластмассовых деталях», Студенческие Дни науки в ТГУ-2021: научно-практическая конференция (Тольятти, 5-30 апреля 2021 года): Сборник студенческих работ / отв. за вып. С.Х. Петерайтис. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2021. 1 оптический диск.

39. 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 13.12.2021).

40. Сварочное оборудование [Электронный ресурс]. URL: [https://www.autowelding.ru/publ/1/1/svarka\\_plastmass\\_ultrazvukom/2-1-0-231](https://www.autowelding.ru/publ/1/1/svarka_plastmass_ultrazvukom/2-1-0-231) (дата обращения 12.12.2021).

41. Свойства пластмасс [Электронный ресурс]. URL: [https://e-plastic.ru/slovar/c/stepen\\_polimerizatskii/](https://e-plastic.ru/slovar/c/stepen_polimerizatskii/) (дата обращения 23.12.2021).

42. Сергеев А. Г. Метрология: Учебник. М.: Логос, 2004. 288 с.: ил.

43. Способ ультразвуковой сварки деталей. из термопластов. Патент СССР 1384395. Патент SU1384395A1 Method of ultrasonic welding of parts made of thermoplastic materials. Applicants STI University [SU]. Inventors Povalyaev V.A. [SU]; Bekmurzaev L. A. [SU]; Bajramukova N. S. [SU]; Volkov S. S. [SU]. Classifications IPC B29C65/08; B29C65/10; (IPC1-7): B29C65/10. Publication SU1384395A1·1988-03-30.

44. Тагер А. А. Физикохимия полимеров. 3-е изд., переработанное. М.: Химия, 1978.

45. Фролова В. В. Теоретические основы сварки. М.: Высшая школа, 1970. 692 с.: ил.
46. Тростянская Е. Б., Комаров Г. В., Шишкин В. А. Сварка пластмасс. М., 1967. 365 с.
47. Тростянская Е. Б. и др. Сварка пластмасс / Е. Б. Тростянская, Г. В. Комаров, В. А. Шишкин. М.: Машиностроение, 1967. 252 с.: ил.
48. Ультразвуковая сварка [Электронный ресурс]. URL: Kirkland, T. Ultrasonic Welding: The Need for Speed Control/ T. Kirkland - Plastics Decorating, 2012 (дата обращения: 22.04.2022).
49. Учебные пособия, диаграммы рассеяния [Электронный ресурс]. URL: Tutorials/SCATTER/scatterplots/effect.htm. Address data 2019.01.29. (дата обращения: 06.05.2022).
50. Элементарная статистика. Учебные пособия. [Электронный ресурс]. URL: Elementary Statistics. Tutorials. Effect size. Site Emory University. <http://www.psychology.emory.edu/clinical/bliwise/> (дата обращения: 22.04.2022).