

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)

Инжиниринг перспективных материалов и диагностика поведения материалов в
изделиях

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Зависимость прочности ультразвукового сварного соединения
пластмасс от времени сварки.

Студент Е.Б. Савина ...
(И.О. Фамилия) (личная подпись)

Научный С.В. Мурашкин
руководитель (ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2022

Содержание

Введение	3
1 Общие сведения о пластмассах	6
2 Виды и методы сварки пластмасс	12
3 Сущность метода ультразвуковой сварки пластмасс	14
4 Аналитический обзор методов оценки качества сварных соединений пластмасс	16
5 Экспериментальная часть.....	21
5.1 Материал	21
5.2 Выбор метода испытания	23
5.3 Изготовление образцов	26
5.4 Оборудование и средства измерения	32
5.5 Проведение испытаний	37
6 Обработка экспериментальных данных	41
6.1 Представление первичных измерений	41
6.2 Статистическая обработка результатов серий измерений	41
6.3 Анализ полученных результатов.....	44
6.4 Статистический анализ экспериментальных данных	48
6.4.1 Корреляционный анализ.....	49
6.4.2 Регрессионный анализ	54
Заключение.....	67
Список используемой литературы.....	70
Приложение А Результаты первичных измерений, диаграммы «нагрузка-перемещение» и вид образцов после испытаний на растяжение	75
Приложения Б Результаты замеров сварных образцов	83
Приложение В Результаты статистической обработки результатов испытания	85

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 в процессе эксплуатации важна для всех изделий. Еще на стадии проектирования устанавливаются требования, необходимые для безопасной и продолжительной эксплуатации детали или механизма в заданных условиях. Свойства пластмассовых материалов продолжают изучаться в настоящее время, так как несмотря на достаточно долгое использование пластика, их свойства и поведения менее изучены по сравнению с металлами. Особый интерес представляют прочностные характеристики пластмасс и влияние на прочность различных факторов.

Пластмассовые материалы широко распространены в современном мире. Трудно найти области и сферы нашей жизни, в которых не применялись бы пластмассы и изделия из них. Широкое распространение производства пластмассовых материалов и производства изделий из пластмасс пришлось на вторую половину двадцатого века. Пластики начали свой путь с одноразовой посуды, тары, упаковки. Со временем, изделия из пластика вошли во все отрасли промышленности, в машиностроение, медицину. Из пластика делают детские игрушки, мебель, строительные материалы, детали машин, поездов, самолетов, кораблей, бытовую технику, спортивные товары, трубопроводы, контейнеры, нити и волокна. 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. Нет ни одного современного здания, где для отделки не применялись бы пластмассовые материалы. 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. Так, например, полный цикл получения одного пластмассового изделия составляет всего от одной до нескольких минут.

В целом процесс сварки термопластов заключается в образовании неразъемных соединений за счет контакта активированных нагревом соединяемых поверхностей и последующего их охлаждения. Активация проявляется в повышении энергии теплового движения цепных макромолекул, из которых состоят термопласты. А контакт (сближение) активированных макромолекул на расстояния порядка $3...4 \text{ \AA}$, где действуют силы межмолекулярного взаимодействия (силы Ван-дер-Ваальса), достигается приложением к свариваемым поверхностям статического давления [7-9]. Под действием УЗК и статического давления на выступах макро-и микрорельефа контактных поверхностей возникают максимальные динамические напряжения. В результате высокочастотного деформирования, выступы рельефа сминаются, нагреваются и переходят в вязко-текучее состояние (в расплав), а колеблющийся рабочий торец СИ, вытесняя расплав, внедряется в материал термопласта на некоторую глубину [10-12].

В работах [13-15], как правило, предусматривается глубина внедрения до границы раздела свариваемых деталей. Однако расплав течёт и при большей глубине внедрения, но этот процесс в научной литературе [16-17]

освещен недостаточно. Изучение этих реологических процессов, протекающих в зоне УЗС, влияющих на количество связей сцепления активированных поверхностей и, следовательно, на прочность сварных соединений пластмасс является безусловно актуальным.

Выдвигаемая гипотеза: время воздействия ультразвука на зону сварки пластмассового соединения и прочность этого соединения связаны между собой возрастающей зависимостью. Проверка гипотезы будет проведена при изучении поведения сварного соединения образцов, изготовленных из полипропилена марки Бален.

Цель работы – оценить влияние времени воздействия ультразвука (УЗ) в процессе сварки на прочность сварного соединения пластмасс.

Задачи работы:

1. Разработка методики исследования.
2. Проектирование: образца из пластмассового материала; сварочного инструмента-волновода для проведения ультразвуковой сварки (УЗС); ложемента для закрепления образцов при УЗС пластмассовых образцов; приспособления для испытания сварного соединения их пластмасс в испытательной машине.
3. Изготовление: образцов из пластмассового материала; сварного соединения из пластмасс; сварочного инструмента-волновода для проведения УЗС; ложемента для закрепления образцов при УЗС пластмассовых образцов; приспособления для испытания сварного соединения их пластмасс в испытательной машине ф. «Instron», США.
4. Проведение испытаний по определению прочности сварного шва, путем приложения растягивающей нагрузки к сварному соединению.
5. Определение статистической зависимости прочности УЗ-ого сварного соединения пластмасс от времени колебаний рабочей части сварочного инструмента.

1 Общие сведения о пластмассах

Пластмассы — это полимерные высокомолекулярные материалы, широко применяемые в современной жизни во многих ее отраслях. Пластмассы потеснили традиционно используемые материалы - дерево, металл, стекло. Переработка пластмассовых материалов в изделия менее трудоемка, а изделия имеют меньший вес и хороший внешний вид, не требуют особого ухода при эксплуатации. Пластмассы хорошие изоляционные материалы, стойки к химическому воздействию и ударным нагрузкам [1], [2].

Пластмассовые материалы получают полимеризацией - соединением небольших молекул мономеров в молекулы полимеров в результате химической реакции при контролируемых условиях.

Если структурный элемент полимера – мономерное звено – обозначить M , то полимер условно можно записать $[-M-]_n$, где n – это число повторяющихся мономерных звеньев в полимере - степень полимеризации [3]. Полимеры с высокой степенью полимеризации называют высокомолекулярными полимерами. Для гомополимеров, макромолекула которых состоит из одного типа мономерных звеньев, величина степени полимеризации вычисляется отношением молекулярных масс макромолекулы и мономерного звена.

Степень полимеризации важна тем, что от нее зависят многие свойства высокомолекулярных соединений и особенно их физико-механические характеристики. Увеличение длины полимерной цепи приводит к повышению температуры плавления, прочностных свойств пластмасс, химической стойкости [4]. Как правило, используют усредненную степень полимеризации, так как большинство пластмассовых материалов имеют в составе макромолекулы с разной длиной цепи.

Основные свойства полимеров зависят от их химической природы [7]. Для получения полимерных материалов с улучшенными свойствами в их состав могут быть введены различные добавки – другие полимеры,

эластомеры (например, каучук), пластификаторы, модификаторы, стабилизаторы, антифрикционные добавки, добавки, регулирующие электрические свойства, антипирены, красители, антистатика, порообразователи, а также наполнители (тальк, мел, древесная мука, волокна, стекло, каучук и пр.) [49]. Обычно создаются марки пластмассовых материалов с определенным комплексом улучшенных свойств. Например, для изделий, длительно эксплуатирующихся на открытом пространстве, создают марки пластмасс, одновременно прочного и стойкого к длительному воздействию температуры, влаги и ультрафиолетовому излучению.

Пластмассы в зависимости от поведения при нагреве подразделяются на термопласты - могут много раз быть подвержены нагреву и охлаждению, не меняя при этом своих свойств, и реактопласты, которые при нагревании не расплавляются.

Полимеры различаются по своему строению: полимеры, основная цепочка макромолекул которых состоит только из атомов углерода, полимеры, которые в молекуле имеют атомы другого химического элемента (азот, сера, кислород и другие элементы). Макромолекулы полимеров подвижны под действием нагревания или влияния электрического поля. Степень подвижности и гибкости макромолекул полимера влияет на его свойства [7].

По реакции к электрическому полю различают полярные – полиэтилен, полипропилен, и неполярные поливинилхлоридные (ПВХ) полимеры, они несовместимы и между собой не свариваются.

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 (рисунок 1). 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 [5].

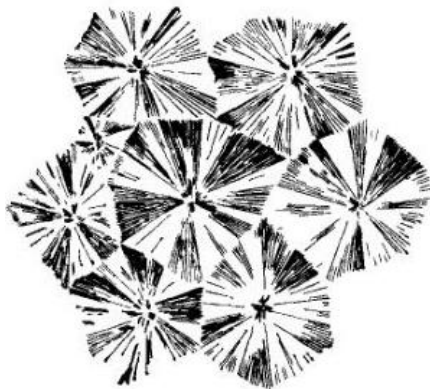


Рисунок 1 – Фрагмент сферолитной структуры кристаллического термопластичного полимера (полипропилен) [5]

Следует упомянуть о фазовом состоянии полимеров. Полимеры – высокомолекулярные соединения, и их температура кипения достаточно высока, а температура разложения гораздо ниже, так как при нагревании полимеры разлагаются, следовательно, полимеры не могут находиться в газообразном состоянии, и имеют только две фазы – твердую и жидкую.

При температуре ниже температуры стеклования полимер обладает свойствами твердого тела (участок 1 рисунок 2). 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 2), а при дальнейшем нагревании – в вязкотекучее состояние (участок 3 рисунок 2). Эти переходы наблюдаются на термомеханической кривой – зависимости деформации от температуры пластмасс, и являются технологическими характеристиками, имеющими значение при переработке пластмасс в изделия [3]. Пример термомеханической кривой приведен на рисунке 2. Образование сварного

соединения происходит при нагревании пластмасс до вязкотекучего состояния [6].

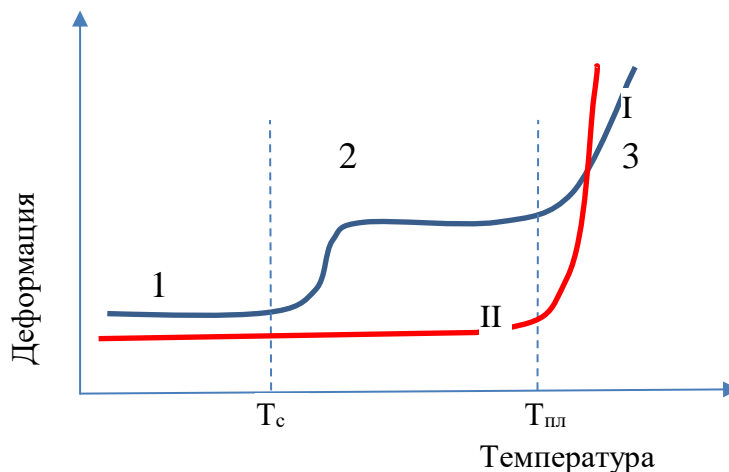


Рисунок 2 – Пример термомеханической кривой аморфного и кристаллического полимера

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 [8]. 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) [50].

Широкое использование полимеров связано с особенностью иметь высокую прочность в сочетании с обратимой деформацией [7]. Прочностные свойства металлов хорошо изучены, тогда как прочность пластмасс продолжает изучаться, в связи с большим количеством факторов, влияющих на ее значение.

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 т.д. Прочностные механические свойства полимеров обычно изучают, разрушая серию стандартизированных образцов, используя универсальную испытательную машину, получая кривую – зависимость нагрузки от деформации образца [42]. Пример зависимостей «нагрузка-деформация» представлен на рисунке 3.

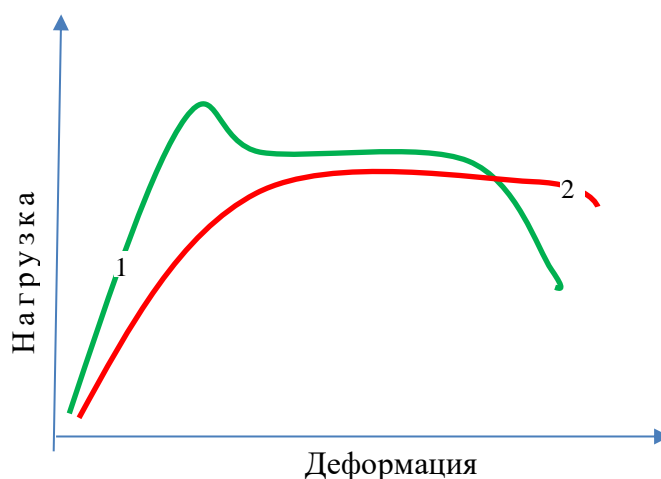


Рисунок 3 – Пример кривой «нагрузка- деформация»

Примеры широко применяемых пластмасс - полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП); поливинилхлорид (ПВХ) – применяются для изготовления труб, пленок, вспененных материалов; полиамиды (ПА), например, капрон, нейлон, фторсодержащие пластики, например, фторопласт – обладают высокой химической и температурной стойкостью, акриловые пластики полиметилметакрилат (ПММА) - применяются в светопроводящих изделиях; пластики на основе сополимера стирола - акрилонитрилбутадиенстирольные (АБС); пластики на основе поликарбонатов – применяются как конструкционные материалы в разных отраслях [6]. Примеры основных синтетических полимеров приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Примеры основных синтетических полимеров [6]

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

Выводы по разделу

В разделе были рассмотрены основные свойства пластмасс, приведены примеры наиболее широко применяемых синтетических пластмассовых материалов, указаны способы переработки и применения термопластов.

2 Виды и методы сварки пластмасс

Технология сварки пластмассовых материалов использует тепловую энергию в чистом виде, или полученную при переходе из других видов энергий [28].

Цель сварки пластмассовых изделий - получение неразъемного прочного соединения без использования крепежных элементов и приспособлений с применением определенного воздействия на свариваемые поверхности, в результате чего происходит образование межатомных связей между свариваемыми частями [29].

Для пластмасс процессы сварки делятся на химический и диффузионный. При химической сварке происходит реакция между свариваемыми частями и химически-активным материалом, введенном в зону сварки [8]. К диффузионным методам сварки пластмасс относятся термоконтактная, термоимпульсная, сварка токами высокой частоты, УЗС, газовая, расплавом полимера, трением. Диффузионная сварка достигается в результате взаимного диффузионного проникновения молекул соединяемых материалов в зоне контакта [8].

Нагревают пластмассы при сварке не выше температуры их разложения. Во время охлаждения образовавшегося сварного соединения происходит затвердевание материала с образованием связей между молекулами материала сварного шва, при этом в зоне шва могут образовываться зоны внутренних напряжений [30]. Все эти процессы в месте сварного шва влияют на свойства сварного пластмассового соединения. Важной задачей технологии сварки является получение прочного неразъемного соединения, которое по характеристикам близко или даже не уступает свойствам самого свариваемого пластмассового материала.

Основные технологические характеристики сварки пластмасс – температура, давление и время воздействия [5]. При подъеме температуры подвижность молекул полимера улучшается, это способствует лучшему проникновению материалов при сварке. Значения давления при сварке нельзя

недооценивать, так как превышение необходимого значения давления может не только замедлить процесс сварки, но и привести к вытеканию расплава из зоны контакта, что может ухудшить внешний вид сварного соединения и его качество.

Сварное соединение пластмассовых деталей широко распространено при производстве и сборке изделий в автомобилестроении и в других отраслях промышленности. Технология сварки выбирается в зависимости от конструкции и размеров изделия, типа свариваемой пластмассы, промышленных объемов производства изделий [11]. Основные типы сварных пластмассовых соединений приведены в таблице 2 [9].

Таблица 2 - Основные типы сварных соединений пластмасс

Стыковое	Угловое	Тавровое	Нахлесточное
Форма кромок - без скоса / со скосом одной кромки / со скосом двух кромок			
Сварной шов - односторонний и двусторонний			

Выводы по разделу

В разделе перечислены виды и методы сварки пластмассовых материалов, типы сварных пластмассовых соединений, указаны основные технологические характеристики сварки пластмасс, отмечены особенности технологии получения сварных пластмассовых соединений.

3 Сущность метода ультразвуковой сварки пластмасс

УЗС заменяет механическую сборку и склеивание мелких и крупногабаритных деталей при сборке автомобильных комплектующих и пр. Сварка УЗ-ом довольно распространенный метод соединения деталей из пластмасс как в промышленных масштабах, так и в лабораторных условиях. При УЗС происходит преобразование звуковых колебаний высокой частоты около 20000 Герц в тепловую энергию. Одновременно в зоне контакта прикладывается определенное усилие, обеспечивая плотное соприкосновение свариваемых поверхностей [8], [10].

Для подачи УЗ-ых волн на поверхность материала используют специальную сварочную установку, которая включает опору, куда укладываются и закрепляются свариваемые пластмассовые образцы деталей, преобразователь, который генерирует и передает механические колебания на волновод и свариваемые образцы, и сварочный инструмент – волновод с наконечником требуемой формы [32, 33]. Примерная схема сварочной установки приведена на рисунке 4.

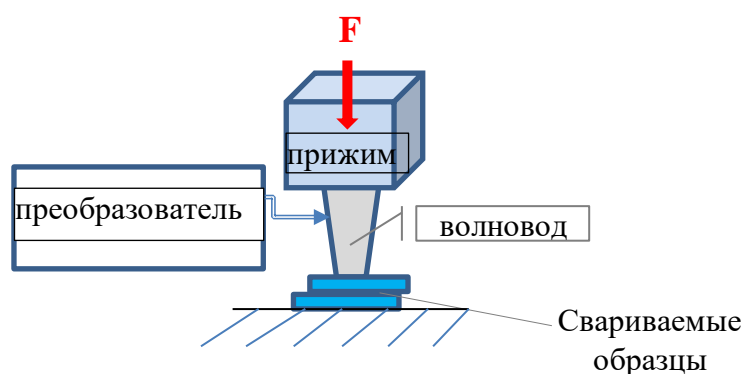


Рисунок 4 - Схема ультразвуковой сварочной установки

Сварка деталей происходит в процессе разогревания материала плотно прижатых поверхностей соединяемых деталей до вязкотекучего состояния под воздействием ультразвуковых колебаний [38]. Получение прочного

соединения происходит вследствие образования межатомных связей между свариваемыми частями [10, 11].

Преимущества УЗС очевидны, она экологически безопасна, так как не применяются дополнительные химические вещества, не происходит избыточное нагревание материалов, не выделяются вредные газы в процессе сварки. Сварка ультразвуком доступна для соединения деталей со сложной геометрией и в труднодоступных местах [39]. Сварка ультразвуком отличается качеством и надежностью, прочность сварного шва достаточно высока. Применяя эту технологию, можно сохранить внешний вид изделия, так как сварной шов, как таковой, в привычном понимании, отсутствует. Данная технология широко применяется как в ручных приборах сварки пластмасс, так и в автоматизированных производственных процессах крупных промышленных предприятий [31].

Качество сварного соединения при УЗС достаточно надежно. Но будет ли прочность в месте сварного соединения деталей из пластмасс сопоставимо с прочностью самой пластмассы? Рассмотрим методы контроля качества сварного соединения.

Выводы по разделу

В разделе приведены краткое описание метода ультразвуковой сварки пластмасс и схема ультразвуковой сварочной установки, указаны преимущества данного вида сварки для термопластов.

4 Аналитический обзор методов оценки качества сварных соединений пластмасс

На практике для проверки качества и прочности сварного соединения пластмассовых изделий существуют много различных методов контроля. Одним из самых популярных является визуальный контроль изделий. Сборочный узел осматривают без применения оптических приборов. При сварке пластика часто образуется дефект с условным названием «нити», представляющие собой тонкие пластмассовые «волоски» затвердевшего пластика. Они влияют на внешний вид деталей и не допустимы в больших количествах. Визуально отмечают также наличие или отсутствие сварного соединения, т.е. отсутствие пропусков мелких привариваемых частей на готовом изделии. Такому контролю подвергают обычно каждое изделие. Визуальный контроль очень важен, он может помочь в выявлении как некачественного сварного соединения, так и в выявлении некачественно выполненного основного изделия [49], заметить такие дефекты, как «расслоение» в месте контакта, коробление или деформация деталей, засоры или смещение свариваемых изделий, «непровар», т.е. прерывание сварного соединения, в случае, когда оно должно быть сплошным. Но «непровар» бывает сложно увидеть при визуальном осмотре, для этого существуют «разрушаемые» методы контроля [43, 44].

Для светотехнических изделий одним из способов контроля качества сварного соединения является контроль внутренних напряжений, путем погружения в рабочую жидкость, например, в этиловый спирт. При этом, в месте возникших при сварке внутренних напряжений произойдет растрескивание изделия, например, из ПММА пластика.

Важным методом контроля герметичности сварного шва пластиковых бачков, изготовленных методом выдувания или литья под давлением и сварки, является методика с использованием воды и сжатого воздуха [34, 35]. Готовое изделие герметично закрывают, подают в него сжатый воздух (давление

промышленного сжатого воздуха 4 - 6 бар) и опускают в сосуд с водой. Отсутствие пузырьков воздуха, видимых в воде, говорит о качестве сварного шва изготовленной детали. Этот метод контроля обычно выборочный, ему подвергают несколько изделий в течении каждой рабочей производственной смены.

Неразрушающие методы качественной оценки сварного соединения требуют специального оборудования, некоторые малоприменимы из-за вредных условий (рентгенографическая дефектоскопия, капиллярная дефектоскопия) [12].

К неразрушающему методу контроля сварного шва относится и метод электрического тестирования трещин или перфораций в сварных швах из пластика, он используется как во время производства, так и в процессе эксплуатации изделий, содержащих сварные швы. По этой методике до или после формирования сварного шва на одну сторону сварного шва наносят покрытие из электропроводящей композиции, при этом на покрытие и другую сторону сварного шва закрепляют электроды. Этот метод может быть применен для испытаний пластиковых трубопроводов, образующих защитную оболочку, например, вокруг изолированных газовых и жидкостных труб. Достоинства метода в возможности проведения неоднократных испытаний в течение всего срока службы действующих трубопроводов, без лишних затрат на демонтаж. Недостатком данного метода испытания, хотя вряд ли это является недостатком, как таковым, может быть ограниченность использования данного метода только для изделий, труднодоступных и требующих постоянного контроля качества сварного шва в течении всего срока эксплуатации.

Механический контроль прочности сварного соединения относится к разрушающим методам контроля [19]. Его проводят, как правило, в испытательной лаборатории. Он заключается в механическом разрушении сварного соединения и получении количественной характеристики [41]. Для каждой такой характеристики создается методика испытаний, которая

заносится в нормативную документацию на изделие, при необходимости закладывается периодичность ее определения, норма может быть определена при наборе статистических данных.

Были рассмотрены методики исследования свойств сварных соединений пластмасс. Цель всех исследований по данному вопросу - повышение прочности сварного соединения и упрощение управления процессом сварки.

Например, ранее были получены данные о изучении прочности сварного соединения, где в ходе эксперимента сварку проводили с помощью двух противоположно расположенных инструментов, колеблющихся с ультразвуковой частотой с разной амплитудой. При достижении температуры сварки в зоне шва, прекращали колебания инструмента, колеблющегося с большей амплитудой, и после охлаждения шва прекращали колебания второго инструмента [13].

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 вязкотекучего состояния пластмассового материала, позволяла расплаву перемещиваться без дополнительного нагрева. При этом, полученное снижение конечной температуры сварки, как показал эксперимент, приводило к повышению прочности и долговечности пластмассового сварного соединения [13].

Испытуемый материал данного исследования – листовая полистирольная пластмасса, сваривались образцы размером 100 x 20 x 2 мм швом внахлест. В эксперименте использовалась УЗС, температура фиксировалась 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 3. Образцы сварных соединений были получены существующим и предлагаемым способами, где δ_g , % - относительная прочность сварного соединения от прочности образца из основного материала; δ_c , % - то же самое после искусственного старения [13].

Таблица 3 - Результаты испытаний сварных соединений полистирольной пластмассы [13]

Способ сварки	Показатели прочности	
	δ_g , %	δ_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.

Научной целью нашей работы и решаемой проблемой по теме прочности сварного соединения пластмассовых материалов является экспериментальное описание вида зависимости (как функции) прочности УЗ-го сварного соединения пластмасс от времени сварки на примере исследования поведения полипропиленового материала марки Бален.

Мы выдвигаем гипотезу, что время воздействия УЗ-ых колебаний рабочей части сварочного инструмента на зону контакта с пластмассой при УЗС пластмассовых изделий (материалов), влияет (при всех прочих одинаковых условиях эксперимента) на прочность УЗ-ого сварного соединения пластмасс. Подтверждать нашу гипотезу мы будем, изучая поведение сварного соединения образцов пластмассового материала полипропилен марки Бален.

Выводы по разделу

В разделе приведён аналитический обзор методов оценки качества сварных соединений пластмасс, рассмотрены методики исследования свойств сварных соединений пластмасс. Указано, что цель всех исследований по данному вопросу - повышение прочности сварного соединения и упрощение управления процессом сварки. Приведен пример одной из рассмотренных работ по исследованиям термографии сварочного процесса и прочности сварных соединений пластмассовых материалов. Указано, что целью настоящей работы является изучение прочности сварных соединений пластмасс, а именно, экспериментальное описание вида зависимости (как функции) прочности УЗ-го сварного соединения пластмасс от времени сварки на примере исследования поведения полипропиленового материала марки Бален. Сформулирована гипотеза о том, что время воздействия ультразвуковых колебаний рабочей части сварочного инструмента на зону контакта с пластмассой при УЗС пластмассовых изделий (материалов), влияет (при всех прочих одинаковых условиях эксперимента) на прочность УЗ-ого сварного соединения пластмасс.

5 Экспериментальная часть

5.1 Материал

Для автомобильной промышленности одним из самых применяемых пластмассовых материалов является полипропилен [14]. Полипропилен — это термопластичный синтетический неполярный полимер. В обычном состоянии полипропилен - твердое вещество в виде гранул натурального цвета, перерабатывается литьем под давлением, выдуванием, экструзией, термоформованием, изделия из полипропилена могут свариваться между собой. Полипропилен получают реакцией полимеризации пропилена или сополимеризацией пропилена и этилена.

Макромолекулы гомополимера содержат одинаковые мономерные звенья пропилена. Блок-сополимер — это цепочка молекул пропилена, прерываемая цепочкой этилен-пропилен сополимера. Основные физические свойства полипропилена показаны в таблице 4.

Таблица 4 – Свойства полипропилена

Плотность, г/см ³	0,90 – 0,92
Показатель текучести расплава, г/10 мин.	2,4 - 3,7
Предел текучести при растяжении, МПа	30 - 36
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	24 - 36
Относительное удлинение при разрыве, %	200 – 400
Температура плавления, °С	160 – 168
Водопоглощение (24 час x 20 °С), %	0,01 - 0,03

Полипропиленовый пластик стоек к агрессивным жидкостям и растворителям – не растворяется в кислотах и щелочах, имеет низкое водопоглощение, он неопасен при контакте с продуктами, стоек к истиранию.

Полипропилен и сополимеры пропилена широко распространены в народном хозяйстве, из этих материалов изготавливают большое количество изделий народного потребления, а также пленок, волокон, труб [14]. Для улучшения эксплуатационных характеристик материала и придания полипропилену необходимых свойств проводят его модификацию, т.е. введение в материал на стадии его производства разнообразных специальных добавок: антистатических – не дают налипать на поверхность изделий пыли и накапливать статическое электричество; добавок, замедляющих горение материала – антипиренов; минеральных наполнителей, увеличивающих прочностные характеристики изделий, добавок, увеличивающих стойкость к разрушению при низких температурах и морозостойкость изделий [40]. В качестве наполнителей широко используется тальк, мел, стекло в виде волокон и гранул разного размера, древесная мука, светостабилизаторы и многие другие [49].

Наиболее распространенным методом сборки пластмассовых деталей в изделие является сварка пластмасс [37].

Для исследований был использован листовой полипропилен марки Бален 01030 ТУ 2211-074-05766563-2015.

Выводы по разделу

В разделе описаны свойства и характеристики полипропиленового материала. Указана марка материала, выбранного для нашего исследования - был использован листовой полипропилен марки Бален 01030 ТУ 2211-074-05766563-2015.

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 [16], [23]. 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 [36].

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 5, б) для фиксации плоских образцов в процессе сварки и приспособление для испытания прочности сварного соединения.

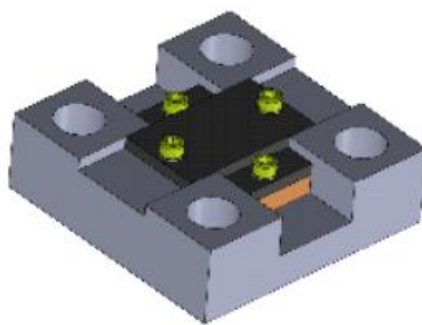
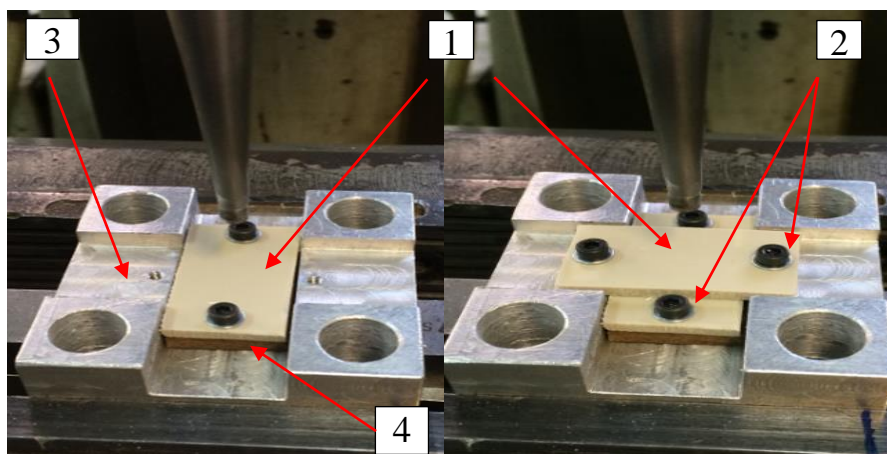


Рисунок 5 - Оснастка для фиксации плоских образцов при сварке

Плоские образцы из пластмассы фиксируются в оснастке винтовыми соединениями, как указано на рисунке 6, для исключения возможности смещения при сварке, для термоизоляции образца предусмотрена термоизолирующая прокладка из текстолита.



1 - плоский образец из полипропилена; 2 – винтовые крепления; 3 - оснастка;
4 – термоизолирующая прокладка

Рисунок 6 - Закрепление образца в оснастке

Приспособление для испытания прочности сварного шва (рисунок 7, 8) было спроектировано таким образом, чтобы при испытании растягивающая нагрузка действовала непосредственно на сварное соединение перпендикулярно плоскости сварного шва.

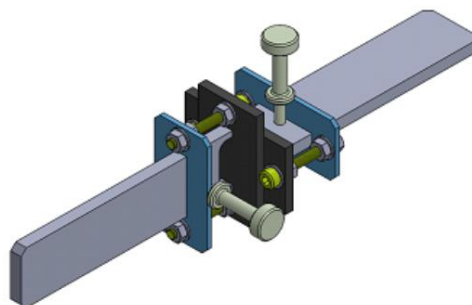


Рисунок 7 - Приспособление для испытания прочности сварного шва

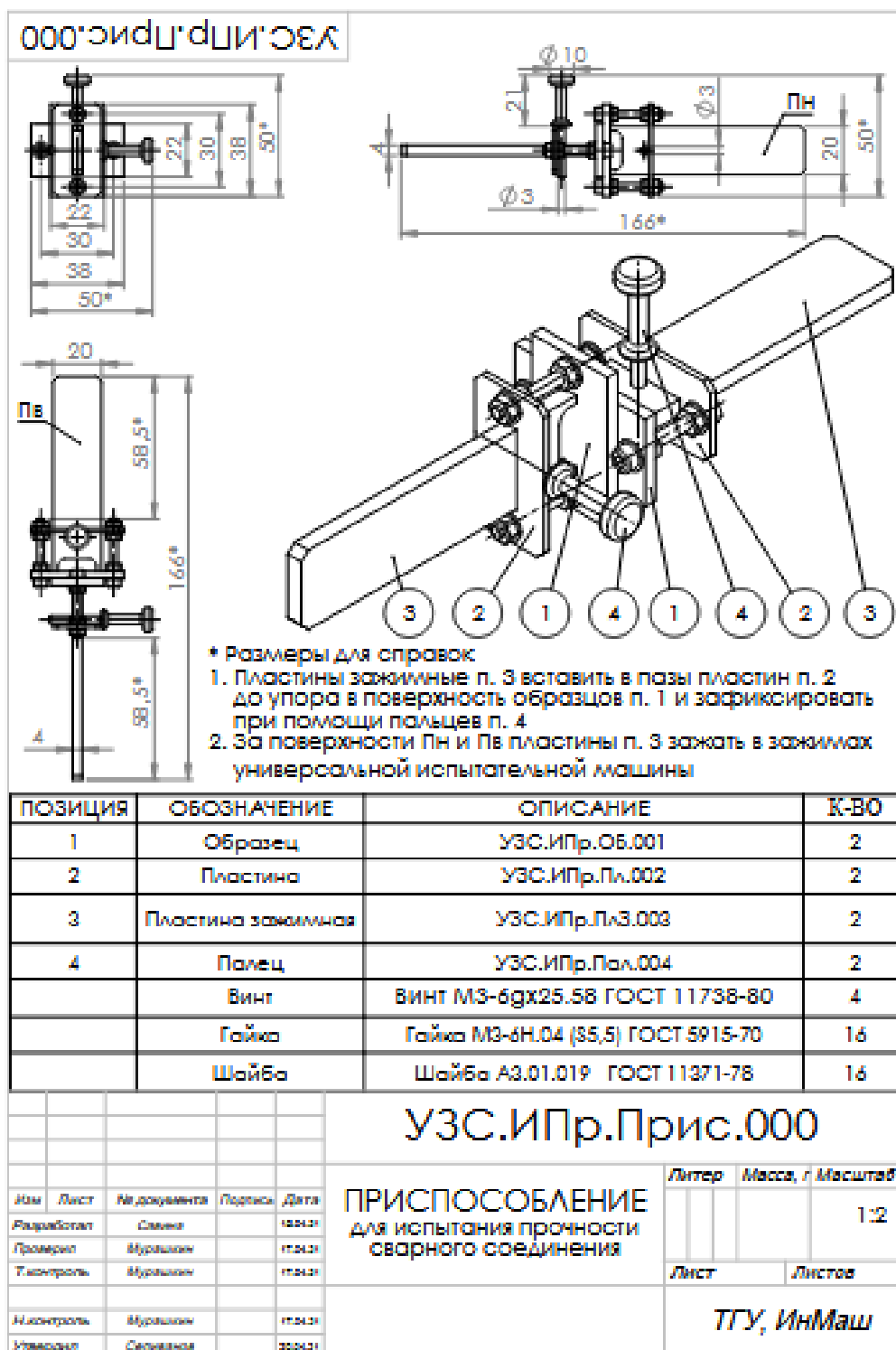


Рисунок 8 - Рабочий чертеж приспособления в сборе

Испытание по нашей методике будет проводиться на универсальной испытательной машине. При испытании фиксируется максимальное усилие, затраченное на отрыв друг от друга сваренных пластин.

Выводы по разделу

Приведено описание методики проведения эксперимента. Указан выбранный метод механических испытаний на растяжение, на основании которого была разработана методика испытаний.

Описано, что потребовалось спроектировать и изготовить специальную оснастку для фиксации образцов-пластин в процессе сварки и приспособление для испытания прочности сварного соединения. Приведен чертеж приспособления для испытания сварного соединения пластмасс, а также рисунок сварочной оснастки и схемы закрепления пластмассовых образцов в оснастке при проведении УЗС.

Приведено уточнение о способе испытания сварного соединения. Приспособление для испытания прочности сварного шва было спроектировано таким образом, чтобы при испытании растягивающая нагрузка действовала непосредственно на сварное соединение перпендикулярно плоскости сварного шва.

5.3 Изготовление образцов

Образцы изготавливались из листового полипропиленового пластика марки Бален толщиной 3 мм с гладкой не тисненной поверхностью. Всего было изготовлено 130 плоских образцов, эскиз образца представлен на рисунке 9.

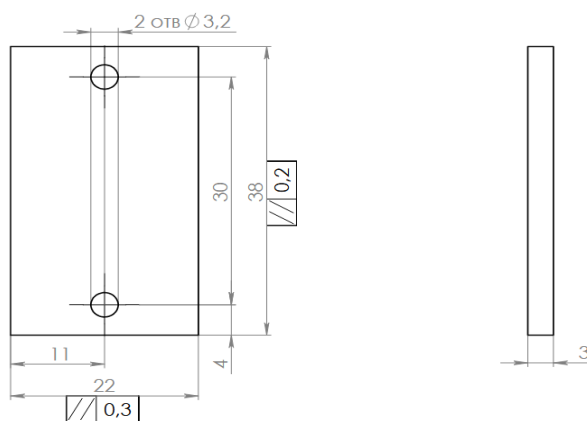
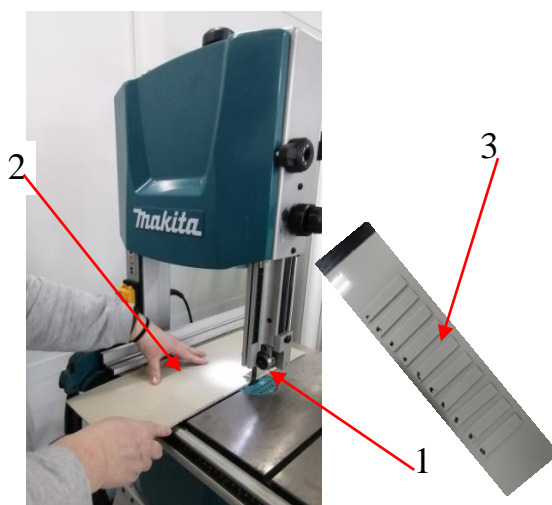


Рисунок 9 – Эскиз образца для испытаний

Образцы были вырезаны на ленточной пиле «Makita» (рисунок 10), пластмассовая стружка по периметру образца была удалена.

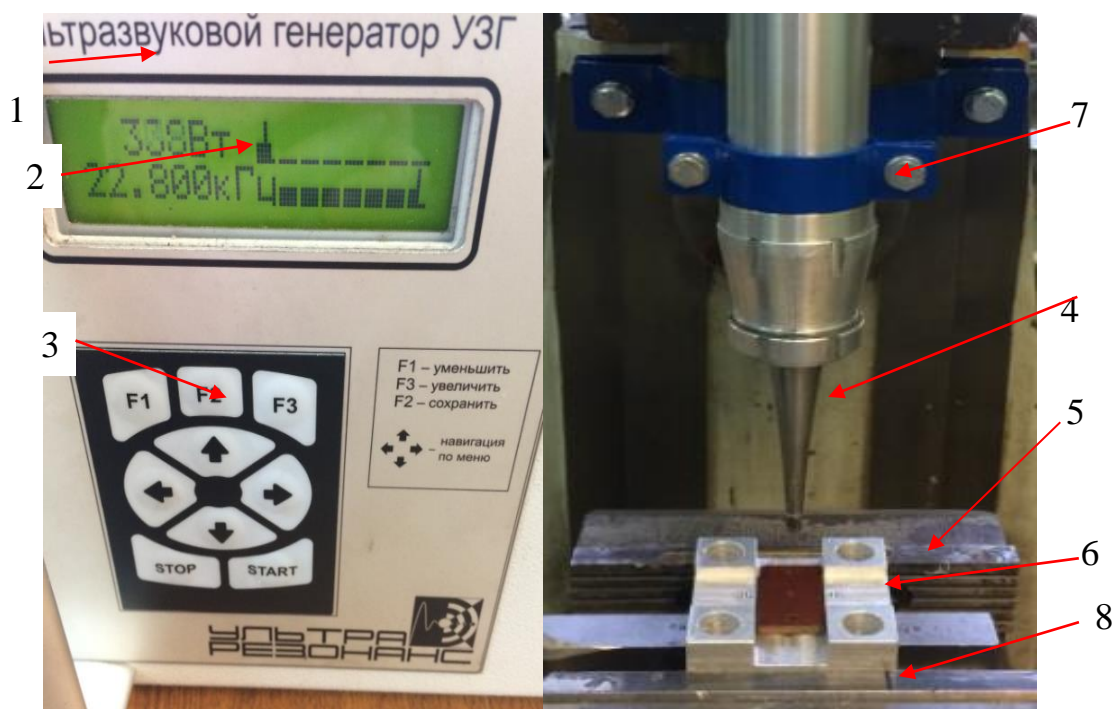


1 – ленточное полотно; 2 – листовой полипропилен; 3 – плоские образцы

Рисунок 10 – Вырезка плоских образцов на ленточной пиле

Для получения сварного соединения пластмассовые образцы сваривались попарно внахлест методом контактной точечной УЗС в центре образца, с фиксированным временем протекания УЗ-ого импульса. Время сварки, при всех других равных условиях, менялось с шагом 0,2 с.

В качестве сварочного оборудования использовали стенд (рисунок 11), в состав которого входит УЗ-ой генератор (1), УЗ-ой сварочный инструмент (4) и стол (5) с оснасткой (6), для закрепления образцов из пластика. Оснастка с образцом и сварочный инструмент были смонтированы на универсальном фрезерном станке.



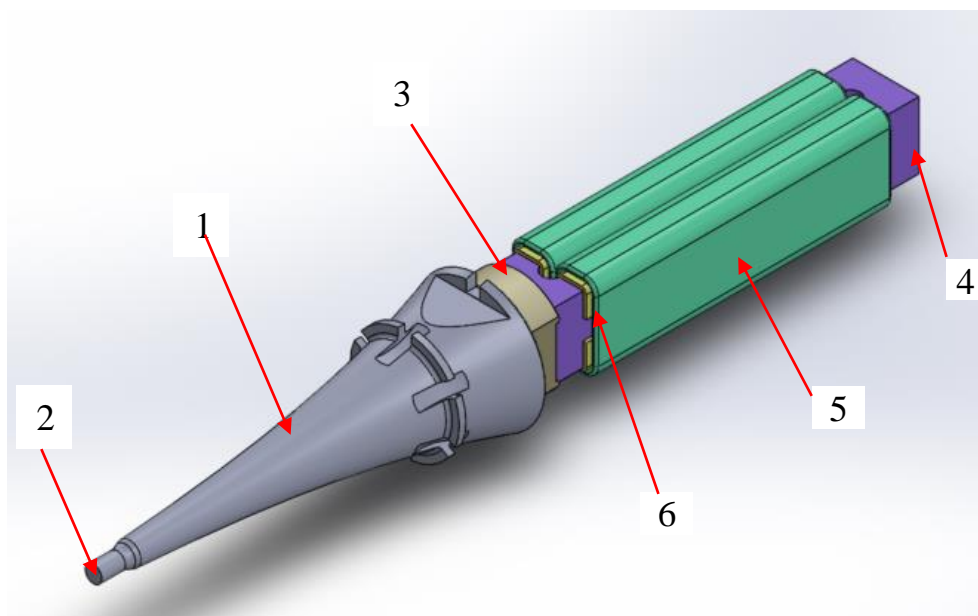
1 – УЗ-ой генератор; 2 - экран индикации (мощность, частота); 3 - табло управления; 4 - УЗ-ой сварочный инструмент (волновод); 5 - рабочий стол станда; 6 - приспособление для фиксации образцов во время сварки; 7 - хомут крепления устройства к пиноли фрезерного станка; 8 - тиски металлические для жесткого крепления приспособления фиксации образцов

Рисунок 11 – Стенд для УЗС пластмассовых образцов

Выходная мощность генератора составляла 330 ± 10 Вт, амплитуда и частота колебаний, соответственно: 70 мкм и 22800 Гц, сила прижатия торца волновода к образцу поддерживалась в пределах 25 ± 2 Н при помощи системы грузов и калибровочной пружины.

Всего определено тринадцать серий испытаний для решения задачи нашего исследования, а именно, получения и оценки зависимости влияния времени сварки на прочность сварного шва.

Математическая модель УЗ-ой колебательной системы представлена на рисунке 12. Диаметр цилиндрической рабочей части сварочного инструмента равен 5 мм.



1 - сварочный инструмент (титановый сплав ВТЗ-1); 2 - рабочий торец сварочного инструмента; 3 - переходник (сталь 45); 4 - магнитострикционный преобразователь (пермендюр марки К49Ф2); 5 - обмотка возбуждения (провод МГТФ-0,75); 6 - щечки изоляционные (фторопласт-4)

Рисунок 12 - Модель УЗ-ой колебательной системы

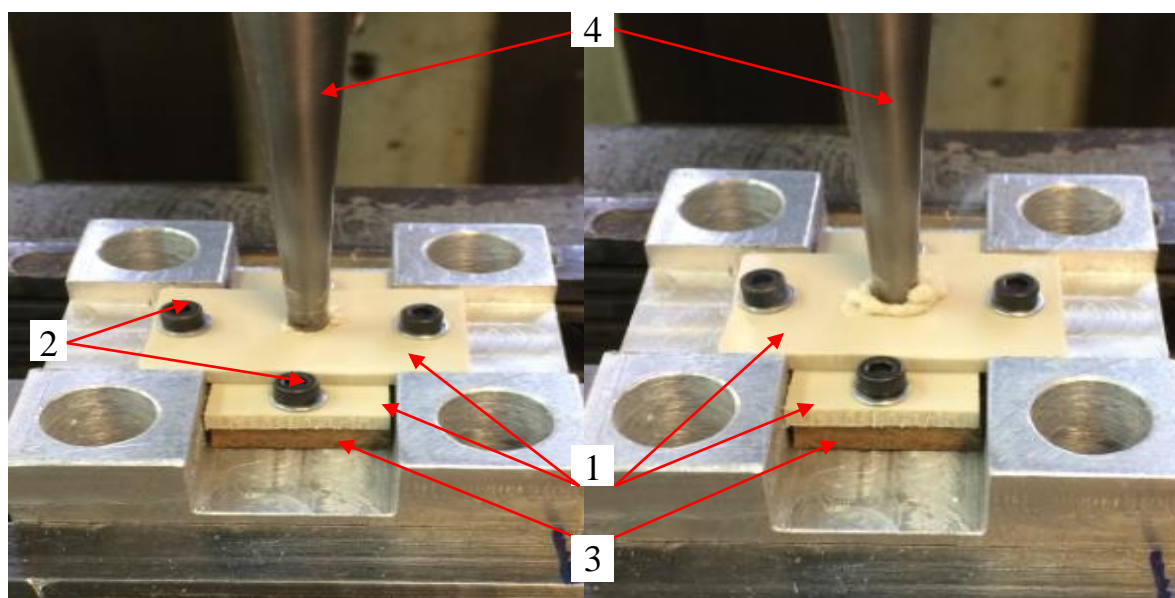
УЗС была проведена вручную, образцы сварены внахлест, время сварки варьировали в диапазоне от 1,2 с до 3,6 с (таблица 5). Всего было проведено 13 серий экспериментов по изготовлению образцов пластмассовых сварных соединений.

Таблица 5 - Время сварки

№ серии испытаний	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Время сварки (t), с	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6

Порядок сварки образцов. Перед сваркой в оснастку, закрепленную на рабочем столе, укладывается один плоский пластмассовый образец и фиксируется при помощи винтов. Вторым плоский образец укладывается на первый крест-накрест и плотно без зазора фиксируется винтами (рисунок 6).

К поверхности образца прижимается торец волновода с фиксированным усилием и включается УЗ-ая установка (рисунок 13). Время сварки устанавливается в соответствии с таблицей 5. После окончания процесса сварки волновод отводится от образца, сваренный образец освобождается от крепления и маркируется.



1 – плоские образцы полипропилена; 2 – винтовое крепление плоских образцов; 3 - термоизолирующая прокладка; 4 – сварочный инструмент (волновод)

Рисунок 13 – Получение сварных соединений полипропилена

Были получены 65 образцов сварных соединений полипропиленовых пластмассовых образцов (рисунок 14) - 13 серий по пять образцов в каждой.



1 и 2 – образцы сварных соединений пластин

Рисунок 14 – Образцы сварных соединений полипропилена, изготовленных УЗС

После изготовления образцы кондиционировались в течение 24 часов в стандартной атмосфере согласно ГОСТ 12423 при температуре $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $(50 \pm 10)\%$ [15].

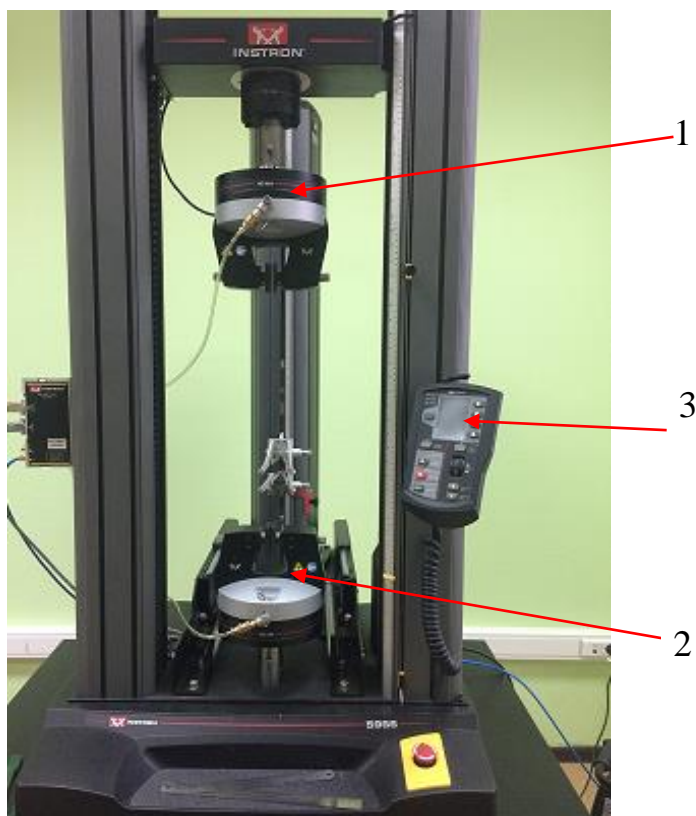
Выводы по разделу

В разделе содержится описание изготовления образцов сварных соединений полипропилена. Приведены рисунки оборудования для изготовления образцов, оснастки для УЗС, схема крепления образца в оснастке. Указаны режимы ультразвуковой сварки экспериментальных образцов. Выходная мощность генератора составляла 330 ± 10 Вт, амплитуда и частота колебаний, соответственно: 70 мкм и 22800 Гц, сила прижатия торца волновода к образцу поддерживалась в пределах 25 ± 2 Н при помощи системы грузов и калибровочной пружины.

Всего было изготовлено тринадцать групп образцов для решения задачи нашего исследования, а именно, получения и оценки зависимости влияния времени сварки на прочность сварного шва. УЗС была проведена на специальном стенде, образцы сварены внахлест, время сварки варьировали в диапазоне от 1,2 с до 3,6 с.

5.4 Оборудование и средства измерения

Испытания на растяжение проводятся на испытательной машине, с погрешностью при измерении нагрузки не более 1 % измеряемой величины, и постоянной скоростью раздвижения зажимов [16]. Был проведен анализ требуемой чувствительности испытательной машины модель 5966 производства фирмы «Instron», США (рисунок 15), с датчиком усилием 10кН [24, 25]. Пределы допускаемой погрешности данной модели составляют $\pm 0,5\%$, что удовлетворяет предъявляемым требованиям к испытательной машине и нашим условиям. Диапазон и точность измерения перемещения траверсы позволяет регистрировать перемещение до пятого десятичного знака.



1 – подвижная траверса; 2 – неподвижная траверса; 3 – пульт управления

Рисунок 15 - Универсальная испытательная машина Instron

Выбранная испытательная машина представляет собой блочно-модульную опорную конструкцию высокой жесткости, состоящую из верхней плиты и основания, на котором закреплена нагрузочная рама с двумя колоннами, на которых установлены подвижная и неподвижная траверсы [24-25]. Динамометрический датчик имеет максимальное усилие 10 кН, что подходит для наших испытаний, пневматические зажимы удобны для закрепления испытываемых образцов. Компьютер с программой для управления испытаниями позволяет получать результаты в числовом и графическом видах (рисунок 16).

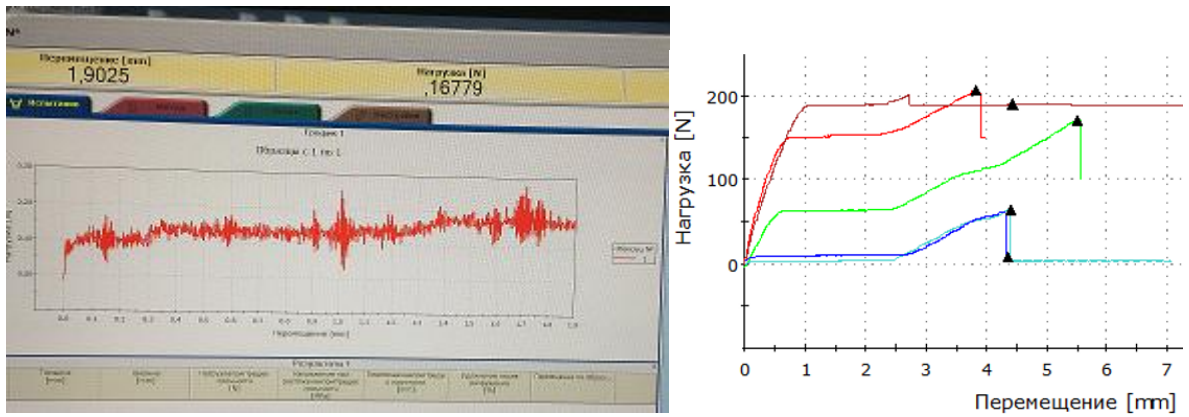


Рисунок 16 – Графическая форма результатов измерений – диаграмма «нагрузка-перемещение»

В момент разрушения образца движение траверсы останавливается, на мониторе компьютера отображаются полученные данные результата испытаний.

Замеры образцов перед испытанием проводились штангенциркулем (рисунок 17), толщиномером (рисунок 18), индикатором (рисунок 19). Замерялись размеры образца, глубина внедрения сварного инструмента.



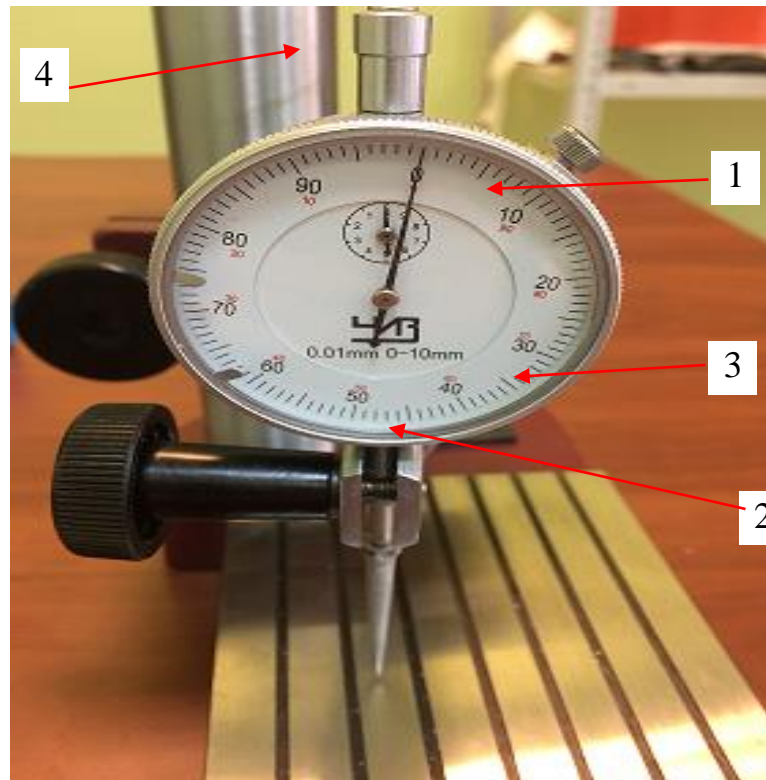
Рисунок 17 - Штангенциркуль электронный КАЛИБРОН ЩЦЦ-1 0-150

Штангенциркуль применялся нами для измерения линейных размеров образцов при их изготовлении. Нами был выбран ШЦ с диапазоном измерений от 0 до 150 мм, с ценой делений шкалы 0,01 мм. При измеряемой длине от 0 до 100 мм включительно выбранный ШЦ имеет предел допускаемой абсолютной погрешности при измерении $\pm 0,03$ мм, что приемлемо для наших измерений [26].



Рисунок 18 – Толщиномер индикаторный ABSOLUTE Digimatic

Толщиномер был выбран нами для измерения толщины сваренных образцов вне области сварного соединения. Его диапазон от 0 до 12 мм, разрешение 0,001 мм, погрешность ± 3 мкм.



1 – шкала индикатора; 2 – измерительная головка; 3 – плита; 4 - - штатив

Рисунок 19 - Индикатор часового типа ИЧ-10

Индикатор часового типа ИЧ-10 был выбран для замера глубины проникновения сварного инструмента в материал образца при сварке. Индикатор удобно закреплен на штативе. Нами был использован индикатор с диапазоном измерений от 0 до 10 мм, его цена деления 0,01 мм, размах показаний 3 мкм [27].

Выводы по разделу

Приведено описание и характеристики оборудования и средств измерения, примененных при проведении эксперимента. Испытания на растяжение проведены на универсальной испытательной машине Instron, измерения образцов проведены поверенными СИ.

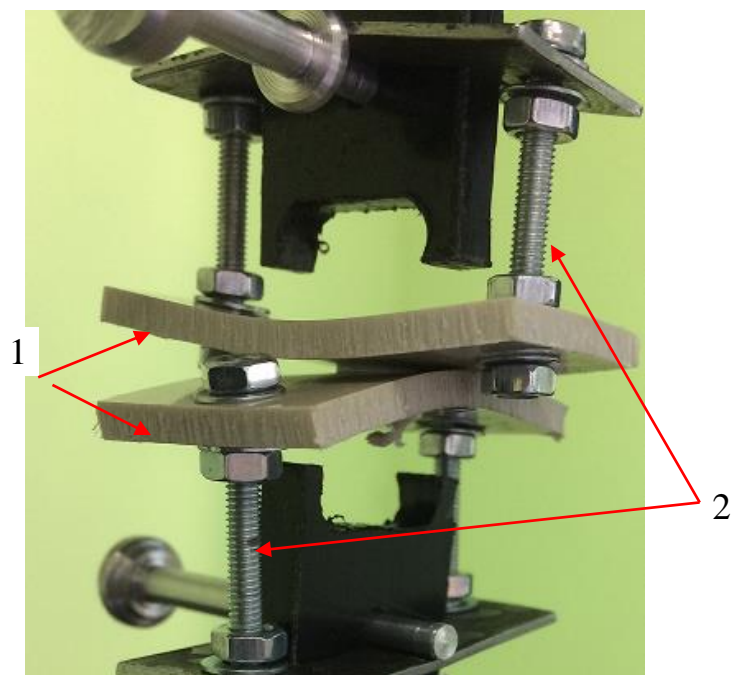
5.5 Проведение испытаний

Исследуемой характеристикой мы выбрали количественную оценку – нагрузку (Н), затрачиваемую на разрушение сварного соединения. Для ее определения мы провели 13 серий механических испытаний на растяжение образцов сварных соединений из полипропилена.

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 [17].

К образцу прикладывается растягивающая нагрузка с постоянной скоростью перемещении подвижной траверсы (1 мм/мин.). Все образцы всех серий испытаний испытывались при одинаковых условиях с одной и той же скоростью испытания для получения достоверных результатов эксперимента. В процессе испытания фиксируется максимальное значение нагрузки, при которой происходит разрушение образца. На протяжении всего испытания непрерывно регистрируется нагрузка и деформация образца.

Поведение сварных образцов полипропилена во время испытания на растяжение представлены на рисунках 20 и 21.



1 – сваренные пластины полипропилена; 2 - винтовое крепление приспособления

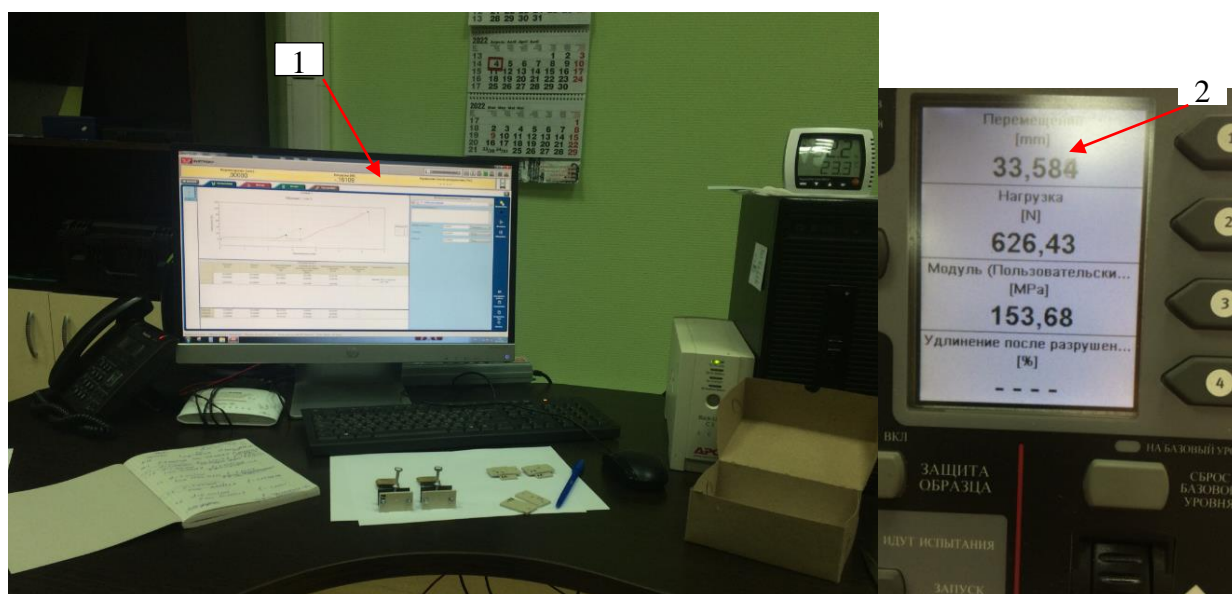
Рисунок 20 – Образец сварного соединения полипропилена во время испытания на растяжение



Рисунок 21 - Образцы сварного соединения полипропилена в момент разрушения

Результаты испытаний выводятся на панель управления и монитор компьютера (рисунок 22) в виде числового значения и диаграммы «нагрузка-перемещения» (рисунок 16). Первичные результаты испытаний всех тринадцати серий сварных соединений представлены на рисунках А.1 – А.13 и в таблицах А.1 – А.12 приложения А.

Испытания проводились в помещении лаборатории испытательного центра при контролируемых условиях испытания при температуре воздуха (23 ± 2) °С и относительной влажности воздуха (50 ± 5) %.



1 – монитор ПК с программным обеспечением для управления испытанием; 2 – пульт испытательной машины

Рисунок 22 – Снятие показаний результатов испытания

Выводы по разделу

Описан ход экспериментального этапа исследования, в процессе которого были выполнены следующие работы:

- был выбран материал для испытания;
- определен метод и разработана методика испытания;
- подобрано необходимое испытательное оборудование;

- спроектированы и изготовлены образцы; оснастка для УЗС и приспособление для испытания сваренных пластмассовых образцов на испытательной машине;
- изготовлены 130 плоских заготовок и 65 образцов сварных соединений для испытаний;
- выполнены замеры глубины проникновения торца сварного инструмента в пластмассовый материал образцов;
- проведены испытания на растяжения образцов сварных соединений в условиях повторяемости; испытания проводились в помещении лаборатории испытательного центра при контролируемых условиях испытания при температуре воздуха (23 ± 2) °С и относительной влажности воздуха (50 ± 5) %;
- получены значения нагрузки, затраченной на разрушение образцов сварного соединения пластмасс для 13 серий образцов.

6 Обработка экспериментальных данных

6.1 Представление первичных измерений

В ходе исследований из листового полипропиленового пластика марки Бален было изготовлено 130 плоских образцов размером 20 x 40 мм, из которых были получены образцы УЗ сварных соединений в количестве 65 шт. Изменяемой переменной являлось время УЗС, которое изменялось с шагом 0,2 с от 1,2 до 3,6 секунды, сварочное усилие и мощность сварки не изменялись и были равны, соответственно: 25 ± 2 Н и 330 ± 10 Вт, частота вибрации 22800 Гц.

При проведении испытания на растяжение сварного соединения полипропилена получены значения нагрузки, затраченной на отрыв сваренных пластин для 13 серий образцов. Результаты первичных измерений и диаграммы «нагрузка-перемещение» представлены на рисунках А.1 – А.13 и в таблицах А.1 – А.12 в Приложении А.

По результатам измерений отмечено увеличение глубины проникновения в материал сварочного инструмента при увеличении времени УЗС. Результаты замеров сварных образцов полипропилена приведены в в таблице Б.1 Приложения Б.

6.2 Статистическая обработка результатов серий измерений

Все полученные результаты испытаний были проверены на надежность методом статистической обработки по ГОСТ 14359 [19]. 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 [18]. После проверки на надежность, определяли надёжные индивидуальные значения согласно ГОСТ 14359 [19].

Среднее арифметическое значение определено по формуле: [19]

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

где x_i - отдельное значение определяемого показателя, N;
 N – количество отдельных значений, входящих в расчет.

Значение стандартного отклонения определено по формуле: [19]

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

Для определения допустимых пределов вычисляется вероятное отклонение искомого показателя X от полученного среднего значения по формуле: [19]

$$\Delta x = \frac{t \cdot S}{\sqrt{N}}, \quad (3)$$

где t – критерий точности взят из приложения 2 ГОСТ 14359.

Границы доверительного интервала $2\Delta x$, в которых заключено искомое значение показателя X , было определено по формулам: [19]

$$\text{Для верхней границы} \quad \bar{x} + \Delta x. \quad (4)$$

$$\text{Для нижней границы} \quad \bar{x} - \Delta x. \quad (5)$$

Стандартное отклонение среднего значения вычисляют по формуле:
[19]

$$\bar{S} = \frac{S}{\sqrt{N}}. \quad (6)$$

Коэффициент вариации среднего значения вычисляют по формуле: [19]

$$Vi = \frac{\bar{S}}{\bar{X}} \cdot 100 \%, \quad (7)$$

где \bar{S} – стандартное отклонение среднего значения, формула (6);
 \bar{X} - среднее арифметическое значение, формула (1).

Относительную ошибку (ε) вычисляют по формуле: [19]

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{\bar{X}} \cdot 100\%. \quad (8)$$

После проведения статистической обработки результатов испытания были получены окончательные средние значения экспериментальных данных, которые представлены в таблице 6. Мы получили значения силы отрыва сваренных пластмассовых пластин друг от друга при разрушении сварного соединения при растяжении и значения глубины погружения в материал сварочного инструмента для тринадцати серий сварных соединений.

Таблица 6 – Окончательные средние значения экспериментальных данных

№ серии испытаний	Время сварки (t), с	Сила отрыва (F), Н	Глубина погружения в материал сварочного инструмента, мм
1	2	3	4
1	1,2	46,60	0,85
2	1,4	86,70	1,12
3	1,6	140,21	1,36
4	1,8	60,28	1,42
5	2,0	118,02	2,54
6	2,2	107,97	2,61
7	2,4	162,59	3,50
8	2,6	112,08	3,32
9	2,8	176,78	3,99
10	3,0	346,38	4,97
11	3,2	177,42	4,13
12	3,4	321,44	4,97
13	3,6	399,70	5,34

Пример статистической обработки по ГОСТ 14359 приведены в Приложении В. Результат статистической обработки результатов испытания в программе Excel [20] приведен на рисунке В.1 Приложения В.

6.3 Анализ полученных результатов

После испытания на разрушение сварного соединения были рассмотрены следы термического влияния точечной УЗС на пластмассовый полипропиленовый материал марки Бален (рисунки 23, 24 и 27). Было отмечено, что четкость и интенсивность термического отпечатка зависит от времени сварки. При воздействии УЗ (от 1,2 с до 1,8 с), этот отпечаток едва заметный (рисунок 23), прочного сварного соединения не произошло, прочных межмолекулярных связей не возникло. Это видно и по значениям

разрушающей нагрузки. Такой след от сварного шва на изделии называют «непровар», сварное соединение разрушается от незначительного усилия.

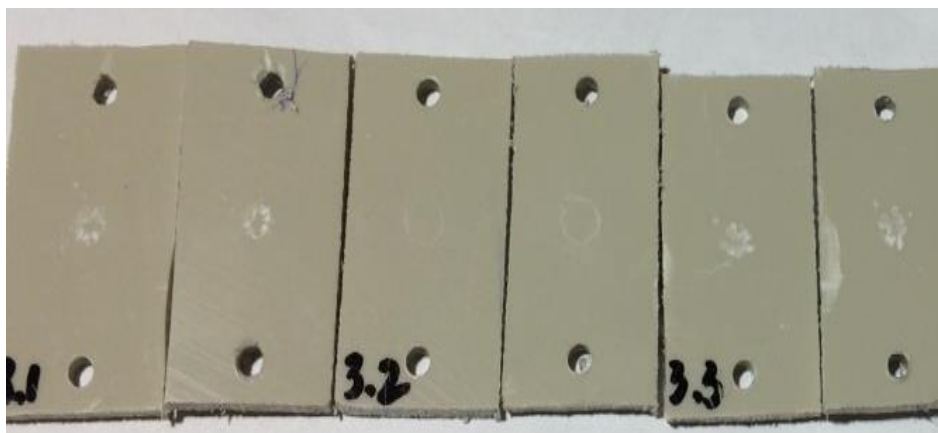


Рисунок 23 – След сварного шва на полипропилене; время сварки (1,2-1,8) с

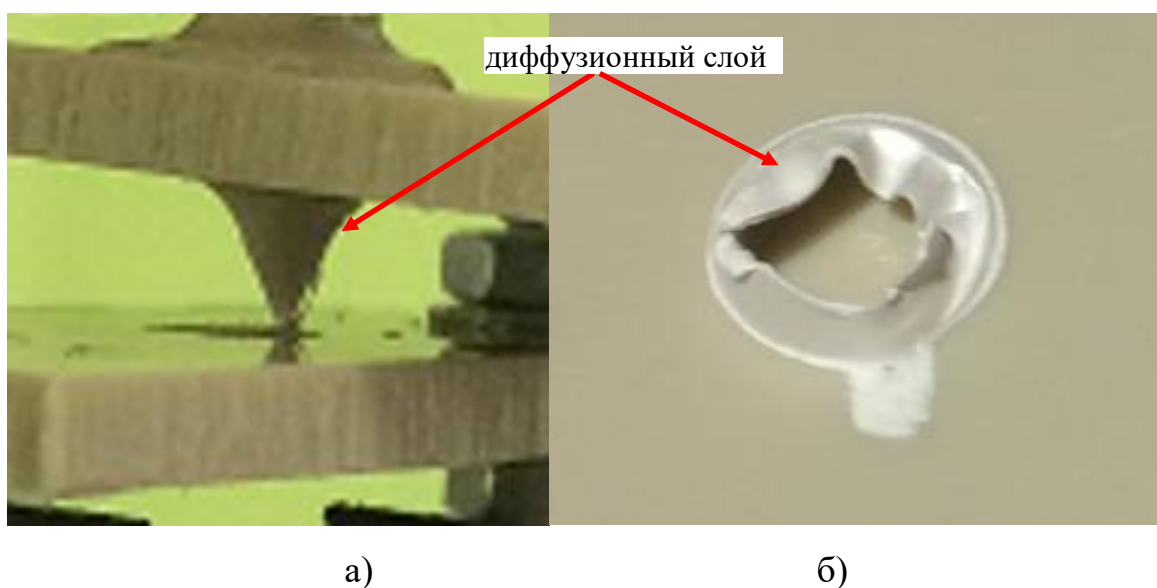
Увеличение времени сварки от 2,0 с до 3,0 с создает условие для формирования в зоне сварки жидкой фазы (расплава), происходит диффузия материала образцов. След от сварного шва отчетливый (рисунок 24).



Рисунок 24 – След сварного шва на полипропилене; время сварки (2,0-3,0) с

При наблюдении за поведением сварного соединения при растяжении отмечено, что материал в зоне сварного соединения тянется и, с образованием «шейки», разрушается (рисунок 25). След от сварного шва хорошо оформлен,

на поверхности сварного соединения отчетливо заметен диффузионный слой материала, образовавшийся во время сварки.



а) сваренные пластины в момент разрушения сварного соединения; б) вид поверхности материала разрушенного сварного соединения

Рисунок 25 – Растяжение сварного соединения полипропилена

При увеличении времени воздействия УЗС от 3,0 с и более, отмечается увеличение площади сварного шва из-за растекания расплавленного материала за границы воздействия сварочного инструмента, схема показана на рисунке 26.

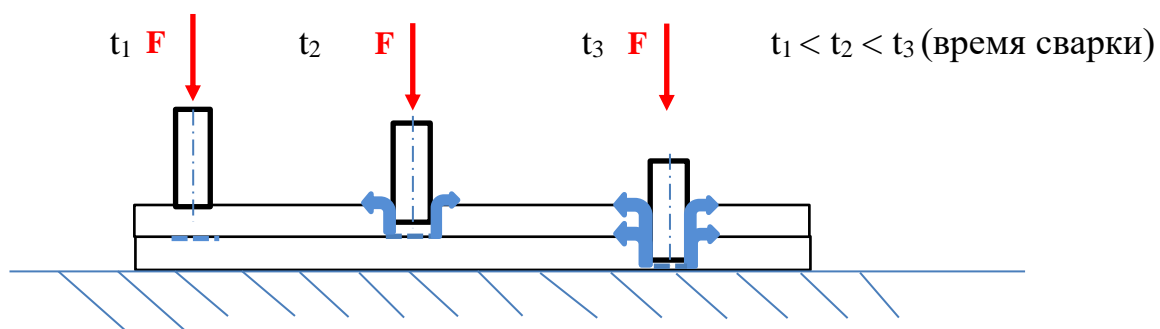


Рисунок 26 – Схема вытекания расплава в процессе ультразвуковой сварки при увеличении времени воздействия ультразвука на зону сварки

Это обусловлено продолжительным нахождением материала в вязкотекучем состоянии, когда он теряет форму и растекается в образовавшееся свободное пространство (зазор между свариваемыми пластинами) или вытекает на поверхность образца. При этом сварочный инструмент глубже погружается в расплав материала, продолжая вызывать его разогрев. При максимальном времени эксперимента инструмент проходит насквозь через оба свариваемых образца, образуя сквозное отверстие в точке сварки.

При увеличении времени воздействия УЗ диффузия расплавленного материала происходит по всей толщине двух свариваемых образцов полипропилена. Образованное сварное соединение при растяжении тянется, как материал, и для его разрушения требуется большее усилие, что подтверждается результатами эксперимента. Можно утверждать, что прочность сварного шва образцов увеличивается с увеличением времени УЗС, что подтверждают экспериментальные данные.



Рисунок 27 - След «сварного шва» на полипропилене; время сварки $\geq 3,0$ с

Характер разрушения - «побеление» и «рваная поверхность» в зоне разрыва (рисунок 27) характеризуют разрушение слоя материала, который образовался при диффузии во время УЗС.

6.4 Статистический анализ экспериментальных данных

При обработке экспериментальных данных, как правило, возникает задача аппроксимации результатов эксперимента аналитической зависимостью, которую можно использовать в последующих расчётах [46]. Эту задачу удобно решать в математической среде MATHCAD и конечно в интегрированной системе статистического анализа и обработки данных STATISTICA.

Научной целью работы и решаемой проблемой является получение статистической зависимости между временем воздействия УЗ и силой отрыва пластмассовых образцов, сваренных контактной точечной УЗС. Также нам интересно получить статистическую зависимость глубины внедрения торца сварочного инструмента в полипропилен и площади сварного шва образца от времени воздействия ультразвука на зону сварки.

Для поиска предполагаемой зависимости необходимо:

- установить значимость связи между совокупностями;
- определить возможность представления этой зависимости в форме математического выражения.

Необходимо уточнить, что полученные функциональные зависимости являются идеализациями, так как не учитывают всегда имеющиеся неизвестные факторы, влияющие на эксперимент – случайные величины (ϵ) (погрешность измерения, погрешность средств измерения, состав материала, пробоподготовка, размеры образцов, погрешность в измерении условий сварки, условия испытания и т.д.).

Определим переменные этих зависимостей. Логично назначить (по аналогии с функциональной зависимостью) параметр время независимой переменной (аргумент), а параметры (сила и глубина) - зависимыми переменными (функция). Выпишем эти переменные из таблицы 6 (столбцы 2, 3, 4).

Ряд экспериментальных значений времени воздействия УЗ, с:

$$t = (1.2 \ 1.4 \ 1.6 \ 1.8 \ 2.0 \ 2.2 \ 2.4 \ 2.6 \ 2.8 \ 3.0 \ 3.2 \ 3.4 \ 3.6). \quad (9)$$

Экспериментальные средние значения силы отрыва, Н:

$$F(t) = (46.6 \ 86.70 \ 140.21 \ 60.28 \ 118.02 \ 107.97 \ 162.59 \ 112.08 \ 176.78 \ 346.38 \\ 177.42 \ 321.44 \ 399.70) \quad (10)$$

Экспериментальные средние значения глубины погружения в материал сварочного инструмента, мм:

$$H(t) = (0.85 \ 1.12 \ 1.36 \ 1.42 \ 2.54 \ 2.61 \ 3.50 \ 3.32 \ 3.99 \ 4.97 \ 4.13 \ 4.97 \ 5.34) \quad (11)$$

6.4.1 Корреляционный анализ

Проанализируем зависимость силы отрыва (F) от времени воздействия ультразвука (t). Для визуального обзора отобразим диаграмму рассеяния экспериментальных точек (рисунок 28) [47].

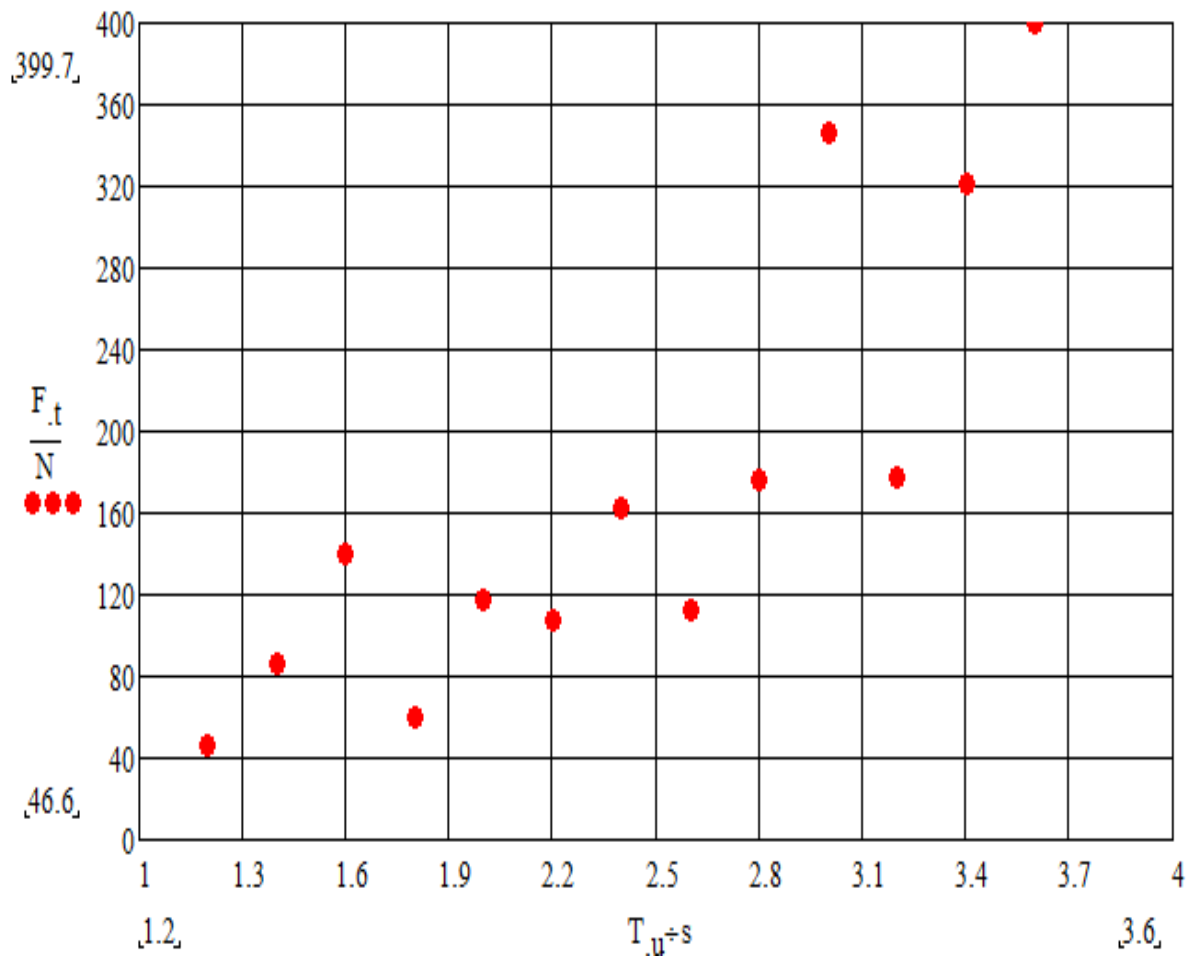


Рисунок 28 - Диаграмма рассеяния экспериментальных точек зависимости средних значений силы отрыва от времени воздействия УЗ

Как видно на диаграмме, между парами величин просматривается очевидная связь. С помощью коэффициента корреляции Пирсона (r) можно определить наличие и силу взаимосвязи между рассматриваемыми массивами чисел:

$$r = \sum \frac{Zxi \cdot Zyi}{n-1}, \quad (12)$$

где n - количество измерений;

Zxi, Zyi – переменная, соответствующая количеству стандартных отклонений относительно среднего значения:

$$Zxi = \frac{Xi - \bar{X}}{Sx}, \quad (13)$$

$$Z_{yi} = \frac{Y_i - \bar{Y}}{S_y}, \quad (14)$$

где X_i, Y_i – отдельное значение определяемого показателя,
 \bar{X}, \bar{Y} – среднее арифметическое значение,
 S_x, S_y – стандартное отклонение.

Значения коэффициента корреляции Пирсона интерпретируются исходя из его абсолютных значений. Возможные значения коэффициента корреляции варьируют от 0 до ± 1 . Чем больше абсолютное значение коэффициента корреляции Пирсона – тем выше теснота связи между двумя величинами, значение равное нулю говорит о полном отсутствии связи, значение равное единице свидетельствует о наличии абсолютной (функциональной) связи. Если значение критерия корреляции Пирсона оказалось больше 1 или меньше минус 1 – в расчетах допущена ошибка [21].

Для оценки тесноты, или силы, корреляционной связи обычно используют общепринятые критерии, согласно которым абсолютные значения коэффициента корреляции Пирсона менее 0,3 свидетельствуют о слабой связи, значения коэффициента корреляции Пирсона от 0,3 до 0,7 свидетельствуют о связи средней тесноты, значения коэффициента корреляции Пирсона более 0,7 говорят о сильной связи между двумя величинами [20, 21].

Определяем линейный коэффициент корреляции Пирсона:

$$r_{xy1} = \text{corr} (T_u, F_t) = 0,841. \quad (15)$$

Из шкалы Чеддока (таблица 7) для качественной оценки тесноты связи видно, что между временем УЗС и силой отрыва существует положительная линейная корреляция с высокой теснотой связи [48].

Таблица 7 – Шкала Чеддока [21]

r_{xy}	Сила связи
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

Проведем оценку статистической значимости коэффициента [21], [45] корреляции при помощи t -критерия (Стьюдента):

$$t_r = \frac{r_{xy}\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}}, \quad (16)$$

Полученное значение t_r сравниваем с критическим значением $t_{крит.}$. При уровне значимости $\alpha=0,05$ и числе степеней свободы $13-2=11$, табличное значение:

$$t_{крит.} = 2,201. \quad (17)$$

Вычислим значение расчётного коэффициента Стьюдента t_r :

$$t_r = \frac{0,841\sqrt{13-2}}{\sqrt{1-0,841^2}} = 5,158, \quad (18)$$

Выполняется условие, что $tr=5,158 > tk_{\text{крит}}=2,201$, следовательно мы делаем вывод о статистической значимости выявленной корреляционной связи.

Коэффициент детерминации (R^2) выражается в процентах и показывает, какая часть общей изменчивости у вызвана влиянием x [20]:

$$R^2 = r^2, \quad (19)$$

где r - коэффициент корреляции Пирсона.

$$R^2=0,841^2 = 0,707. \quad (20)$$

Значение $R^2 = 70,7 \%$ говорит о том, что более чем на 70 % изменение времени УЗС влияет на значение усилия разрушения сварного соединения полипропилена.

Для оценки значимости полученного значения коэффициента детерминации R^2 используется F -критерий Фишера, согласно которому значение R^2 считается значимым, если выполняется условие: $F_p > F_{\text{крит}}$.

$F_{\text{крит}} = 4,84$ – табличное значение при уровне значимости α и числе степеней свободы $k_1 = 1$, $k_2 = n - 2 = 13 - 2 = 11$.

$$F_p = \frac{r_{xy}^2}{1 - r_{xy}^2} \cdot (n - 2), \quad (21)$$

где n – количество наблюдений.

$$F_p = \frac{0,841^2}{1 - 0,841^2} \cdot (13 - 2) = 26,6 > F_{\text{крит}} = 4,84. \quad (22)$$

Итак, мы доказали значимость полученного коэффициента детерминации, следовательно, мы можем утверждать, что для нашего исследования, между временем УЗС и силой отрыва существует положительная линейная корреляция с высокой теснотой связи.

6.4.2 Регрессионный анализ

В практике статистического исследования часто возникает необходимость определить не только корреляционное соотношение между изучаемыми характеристиками, но и установить определенную обусловленность между ними, представив выявленную связь в строгой аналитической форме [20 - 22].

Регрессионные модели можем записать в общем виде:

$$H = hc(tu) + \varepsilon, \quad (23)$$

$$F = Fc(tu) + \varepsilon, \quad (24)$$

где H и F – статистические зависимости, соответственно, глубины внедрения рабочего торца СИ в полипропилен и силы отрыва от времени влияния ультразвука;

tu – время влияния ультразвука на зону сварки;

ε – случайная составляющая, обусловленная множеством неучтенных факторов.

В программе Mathcad имеется восемь встроенных функций для получения аналитических выражений аппроксимирующей функции в явном виде. В нашем случае, по виду экспериментальных данных, представленных на диаграмме рассеивания (рисунок 28), можно использовать регрессию линейным уравнением и логистической функцией:

Простая линейная зависимость описывается уравнением типа:

$$y = a + bx, \quad (25)$$

где a и b – определяемые коэффициенты линейного уравнения.

Итак, имеем диапазон изменения независимой переменной времени сварки (9) и силы отрыва (10).

Находим коэффициенты линейной функции a и b по формулам:

$$b = r \frac{S_x}{S_y}, \quad (26)$$

$$a = \bar{Y} - b \cdot \bar{X}, \quad (27)$$

где S_x, S_y - стандартные отклонения для X и Y ,

\bar{X}, \bar{Y} - средние значения.

С помощью Mathcad вычисляем коэффициенты линейной функции:

$$\text{line}(Tu, Ft) = \begin{pmatrix} -117.948 \\ 121.458 \end{pmatrix}, \quad (28)$$

Полученная функция линейной регрессии с учетом размерности будет иметь вид:

$$F_1(t_u) = -117,948 \text{ Н} + (121,458 \text{ Н/с}) \cdot t_u. \quad (29)$$

Очевидно, что экспериментальные точки не лежат на самой линии регрессии, существует ошибка предсказания (e), которая имеет положительный знак для точек, лежащих над прямой, и отрицательный, для точек под прямой. Лучшую линию регрессии подбирают по методу наименьших квадратов, чтобы общая сумма квадратов ошибок была минимальной:

$$\sum e_i^2 \text{ минимальная.} \quad (30)$$

Логистическая функция описывается выражением:

$$y(x) = \frac{a}{1 + b \cdot e^{-cx}}, \quad (31)$$

С помощью программы Mathcad находим три коэффициента для логистической кривой, которая наилучшим образом аппроксимирует данные в рядах (9) и (10):

$$\text{lgsfit}(T_u, F_t, C_1) = \begin{matrix} -208,218 \\ -6,414 \\ 0,398 \end{matrix} . \quad (32)$$

Тогда, функция логистической регрессии с учетом размерности будет иметь вид:

$$F(t_u) = \frac{208.218 \text{ Н}}{6.414 \cdot e^{-(0.398 \frac{1}{c}) \cdot t_u} - 1} . \quad (33)$$

Таким образом, мы получили аналитические функции (29) и (33), которые можно интегрировать и дифференцировать, т.е. использовать в различных расчетах. Эти функции представлены на рисунке 29.

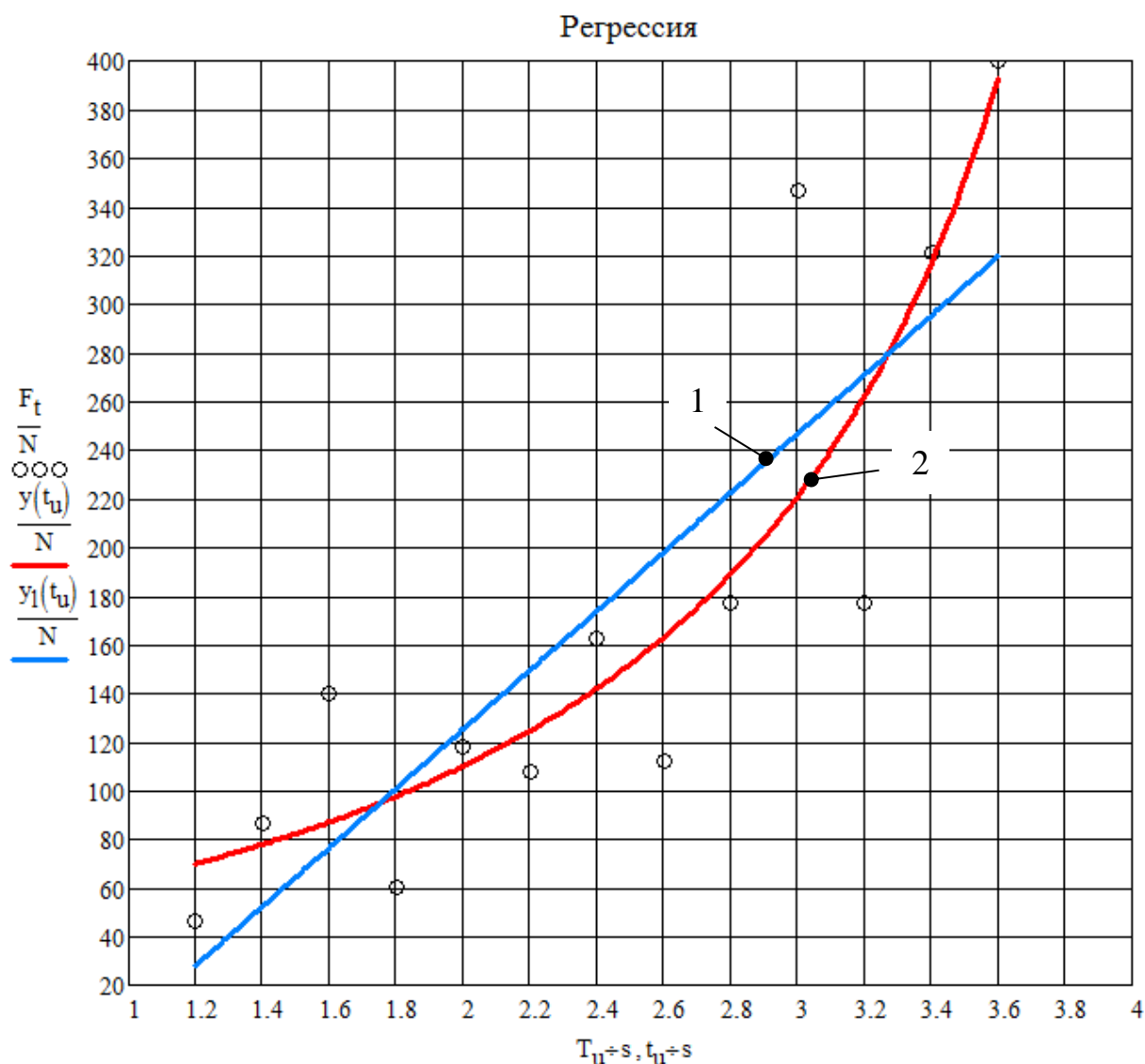
Опытный коэффициент корреляции Пирсона r_{xy1} был найден ранее и равен 0,841. Находим коэффициент корреляции Пирсона и коэффициент детерминации для логистической функции:

$$r_{xy} = \text{corr}(T_u, F_t) = 0,891. \quad (34)$$

Из шкалы Чеддока (таблица 7) опытные данные неплохо аппроксимируются логистической кривой (коэффициент корреляции равен 0,891).

Находим коэффициент детерминации (R^2) по формуле (19):

$$R^2 = 0,891^2 = 0,794 \quad R^2 = 79,4 \% . \quad (35)$$



1 и 2 – соответственно, функции линейной и логистической регрессии

Рисунок 29 – Линейная и логистическая регрессии

Экспериментальные данные лучше аппроксимируются логистической кривой. По результатам анализа можно утверждать, что для полипропилена марки Бален время воздействия УЗ-ых колебаний на зону сварки пластмассового соединения и прочность этого соединения связаны между собой возрастающей зависимостью более чем на 79 %.

По аналогии проведем оценку зависимости глубины внедрения торца сварочного инструмента в материал пластин от времени воздействия ультразвука теми же методами. Используем вектор-столбец

экспериментальных средних значений глубины проникновения рабочего торца сварочного инструмента в материал пластин (11). Диаграмма рассеяния представлена на рисунке 30.

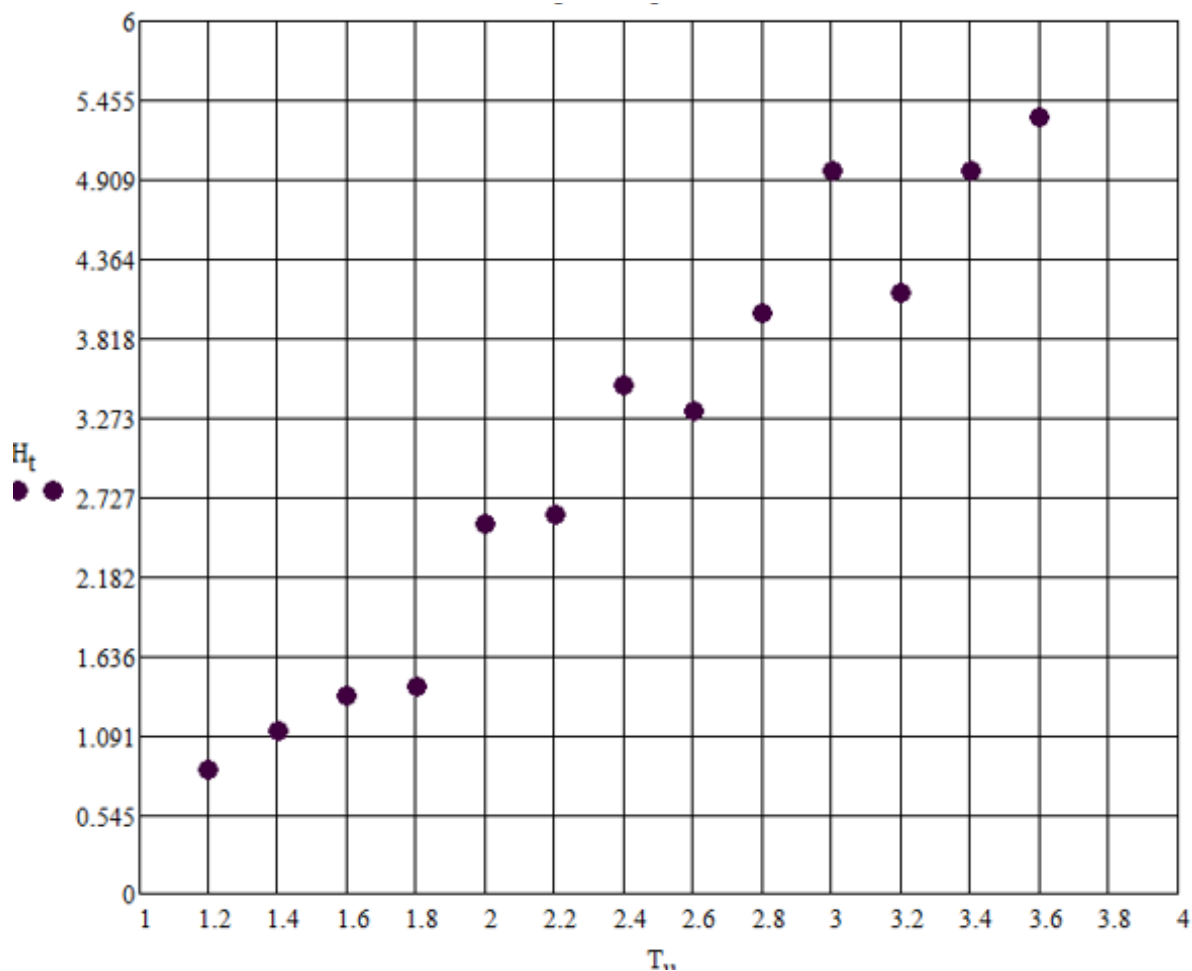


Рисунок 30 – Диаграмма рассеяния зависимости глубины внедрения торца сварочного инструмента в материал пластин от времени воздействия ультразвука

С помощью Mathcad находим коэффициенты линейной функции регрессии a и b :

$$\text{line}(T_u, H_t) = \begin{pmatrix} -1.63 \\ 1.965 \end{pmatrix}. \quad (36)$$

Получаем уравнение линейной регрессии с учетом размерности:

$$h(t_u) = -1,63 \text{ мм} + (1,965 \text{ мм/с}) \cdot t_u . \quad (37)$$

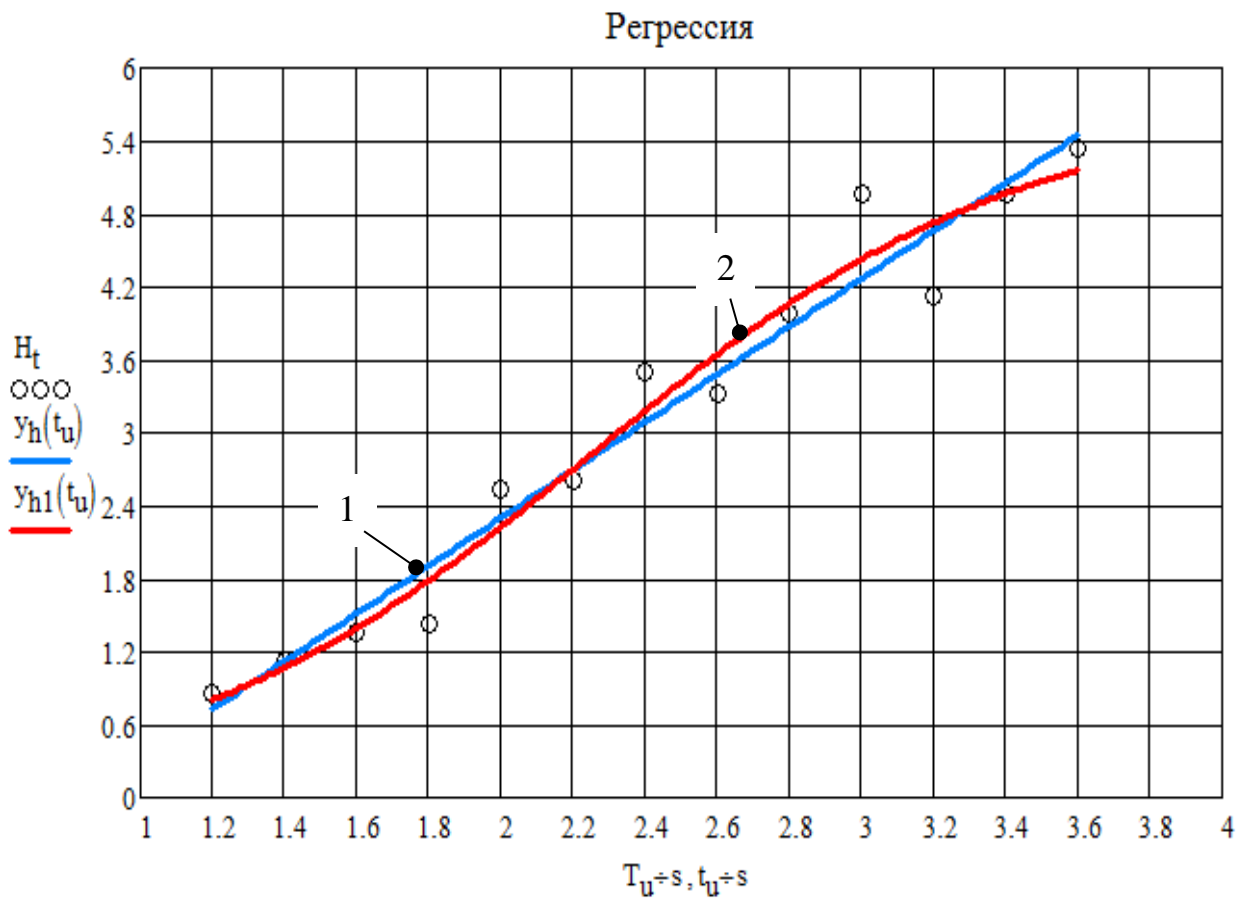
С помощью программы Mathcad находим три коэффициента логистической кривой, наилучшим образом аппроксимирующей полученные экспериментальные данные:

$$\text{lgsfit}(T_u, H_t, C_1) = \begin{matrix} 5,681 \\ 46,708. \\ 1,701 \end{matrix} \quad (38)$$

Тогда, уравнение логистической регрессии с учетом размерности будет иметь вид:

$$h_1(t_u) = \frac{5.681 \text{ мм}}{1 + 46.708 \cdot e^{-(1.701 \frac{1}{c}) \cdot t_u}} . \quad (39)$$

Таким образом, мы получили аналитические функции (37) и (39), которые можно интегрировать и дифференцировать, т.е. использовать в различных расчетах. Графический вид этих функций представлены на рисунке 31.



1 и 2 – линейная и логистическая регрессии, соответственно

Рисунок 31 – График линейной и логистической функции регрессии

Находим коэффициент корреляции Пирсона и коэффициент детерминации:

$$\text{corr}(y_h(T_u), H_t) = 0,977, \quad (40)$$

$$\text{corr}(y_h(T_u), H_t)^2 = 95,4 \% , \quad (41)$$

$$\text{corr}(y_{h1}(T_u), H_t) = 0,980, \quad (42)$$

$$\text{corr}(y_{h1}(T_u), H_t)^2 = 96,04 \% . \quad (43)$$

Видно, что опытные данные лучше аппроксимируются логистической кривой (коэффициент корреляции равен 0,98, а коэффициент детерминации равен 96,04 %).

Коэффициент корреляции Пирсона равен $\text{corr}(y_{h1}(Tu), Ht) = 0,980$, и по шкале Чеддока для качественной оценки тесноты связи, это значит, что между временем УЗС и силой отрыва существует положительная линейная корреляция с высокой теснотой связи.

Значение рассчитанного коэффициента детерминации $R^2 = 96,04$ % говорит о том, что более чем на 96 % изменение времени УЗС влияет на изменения значений глубины внедрения торца сварочного инструмента в материал пластин сварного соединения полипропилена. Для оценки значимости полученного значения коэффициента детерминации R^2 используется F -критерий Фишера.

Итак, мы доказали значимость полученного коэффициента детерминации, следовательно, мы можем утверждать, что для нашего исследования, между временем УЗС и глубиной внедрения торца сварочного инструмента в материал пластин сварного соединения полипропилена существует положительная линейная корреляция с высокой теснотой связи.

По результатам проведенного исследования УЗ-ого сварного соединения полипропилена марки Бален было установлено, что:

- между временем воздействия УЗ-ых колебаний на зону сварки и прочностью этого сварного соединения, а также глубиной внедрения торца сварочного инструмента в полипропилен существуют возрастающее статистические зависимости.

Известно, что прочность при разрыве стержня пластмассового материала рассчитывается по формуле:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F(t)}{A}, \quad (44)$$

$$A = \frac{F(t)}{\sigma}, \quad (45)$$

где A – площадь поперечного сечения образца, мм²,

F – нагрузка, при которой произошло разрушение образца, Н.

Выполненное экспериментальное исследование позволяет оценить величину площади сцепления контактных зон сварного соединения при его растяжении. Допустим, что сила отрыва пропорциональна площади сцепления (площади поверхности разрыва). Тогда площадь сцепления также зависит от времени сварки. А зная значение нагрузки, затраченной на разрушение материала Бален при растяжении, мы можем вывести уравнение для расчета площади сцепления при растяжении.

Нами доказано, что существует функциональная зависимость силы разрыва сварного соединения от времени сварки $f=F(t)$, следовательно, мы можем утверждать, что площадь поперечного сечения сварного шва также зависит от времени сварки.

Мы провели испытания изучаемого материала Бален на растяжение и определили значение показателя «предел текучести при растяжении». Оценочная количественная зависимость площади объёмной поверхности разрыва ($A(t)$) от времени воздействия ультразвука на зону сварки будет иметь вид:

$$A(t) = \frac{F_0(t)}{\sigma_B}, \quad (46)$$

где σ_B - среднее разрушающее напряжение при отрыве для полипропилена «Бален» марки 01030.

На основании выполненных испытаний «на отрыв» найдём оценочную количественную зависимость площади объёмной поверхности разрыва от времени воздействия ультразвука на зону сварки. Введём следующие обозначения:

$$t_u = 1,2s \dots 3,6s, \quad (47)$$

где t_u - диапазон изменения независимой переменной (время сварки, s).

Экспоненциальная оценочная зависимость для силы отрыва, полученная после потенцирования имеет вид:

$$F_0(t_u) = 1 \cdot N \cdot e^{(3,221 + 0,727 \cdot \frac{1}{s} \cdot t_u)}. \quad (48)$$

Среднее разрушающее напряжение при отрыве для полипропилена «Бален» марки 01030:

$$\sigma_B = 30 \text{ МПа}. \quad (49)$$

Тогда, оценочная количественная зависимость площади объёмной поверхности разрыва от времени воздействия ультразвука на зону сварки будет иметь вид:

$$S_0(t_u) = \frac{F_0(t_u)}{(1 - \beta) \cdot \sigma_B}, \quad (50)$$

где β – коэффициент, характеризующий изменения прочностных свойств полипропилена «Бален» марки 01030, образующихся в сварном соединении от перемешивания цепных макромолекул, нарушения их ориентации и др.;

σ_B - среднее разрушающее напряжение при отрыве для полипропилена «Бален» марки 01030.

По выражению (50) можно оценить величину площади объемной поверхности разрыва в зависимости от времени воздействия УЗ-ых колебаний на зону сварки. График оценочной функциональной зависимости площади объемной поверхности разрыва от времени воздействия УЗ-ых колебаний на зону свар (50) представлен на рисунке 32.

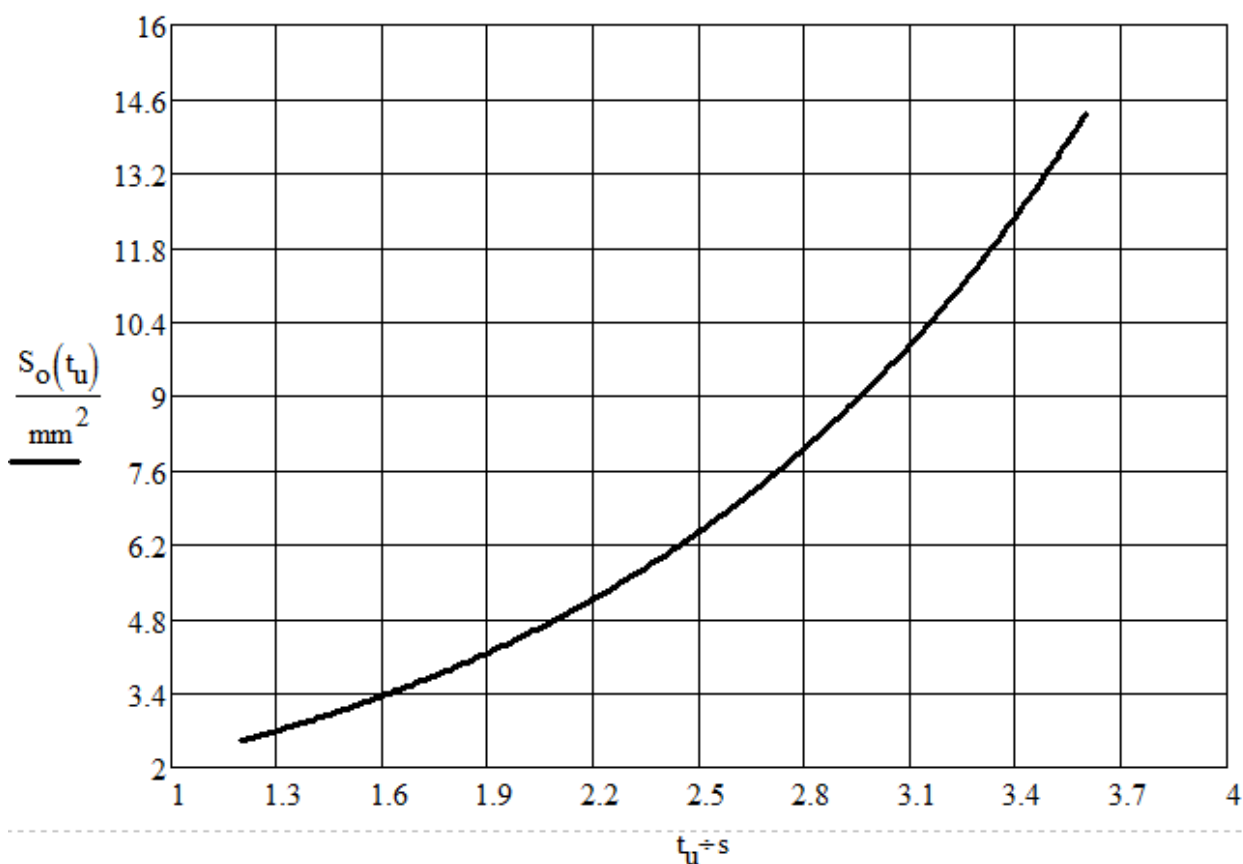


Рисунок 32 - График оценочной зависимости площади объемной поверхности разрыва от времени воздействия УЗ-ых колебаний

Научная новизна работы: экспериментально рассмотрен процесс постепенного внедрения колеблющего рабочего торца СИ в полипропилен до

предельной глубины, равной общей толщине свариваемых пластин; определены адекватные регрессионные модели статистических зависимостей влияния времени воздействия ультразвука на глубину внедрения рабочего торца СИ в полипропилен и на силу разрыва сварного соединения.

Практическая и научная значимость исследования: основные положения проведенного исследования могут лечь в основу дальнейших теоретических разработок. Были найдены аналитические оценочные функции зависимости силы отрыва и глубины внедрения торца СИ в полипропилен от времени воздействия ультразвука на зону сварки. Результаты диссертации могут быть использованы в различных расчетах для исследования свойств пластмассовых материалов при ультразвуковой сварке.

Выводы по разделу

Приведены обработка и анализ экспериментальных данных. Статистическую обработку результатов измерений в каждой группе (выборке) выполняли по ГОСТ 14359, придерживаясь следующего алгоритма:

- вычисляли выборочное среднее \bar{h}_c – среднеарифметическое;
- вычисляли выборочное среднее квадратичное отклонение S_1 ;
- отбрасывали статистически незначимые результаты измерений;
- после отброса, путём пересчета, определяли надёжные индивидуальные значения.

При обработке экспериментальных данных была поставлена задача аппроксимации результатов эксперимента аналитической зависимостью, которую можно использовать в последующих расчётах. Эту задачу решали в математической среде MATHCAD и в интегрированной системе статистического анализа и обработки данных STATISTICA.

Научной целью работы и решаемой проблемой являлось получение статистической зависимости между временем воздействия ультразвука и силой отрыва образцов-пластин, сваренных контактной точечной УЗС. Эта статистическая зависимость была получена и проанализирована.

Также была проведена оценка зависимости глубины внедрения торца СИ в полипропилен и площади сварного шва образца от времени воздействия ультразвука на зону сварки.

Мы провели корреляционный анализ, для этого с помощью определенных коэффициента корреляции и коэффициента детерминации установили значимость связи между совокупностями.

С помощью программы Mathcad были вычислены коэффициенты линейной функции, полученная линейная оценочная функция представлена в графическом и математическом выражении. С помощью программы Mathcad были найдены коэффициенты логистической кривой, наилучшим образом аппроксимирующей полученные экспериментальные данные, полученная логистическая оценочная функция представлена в графическом и математическом выражении.

По результатам проведенного исследования УЗ-ого сварного соединения полипропилена марки Бален было установлено, что:

- между временем воздействия УЗ-ых колебаний на зону сварки и прочностью этого сварного соединения, а также глубиной внедрения торца сварочного инструмента в полипропилен существуют возрастающее статистические зависимости.

Заключение

Данное исследование является первым крупным шагом в изучении прочности пластмасс в условиях рассмотренного процесса постепенного внедрения колеблющего рабочего торца сварочного инструмента в полимер до глубины, равной общей толщине свариваемых деталей.

В рамках выпускной работы мы:

1. Спроектировали и изготовили приспособления:
 - для передачи энергии ультразвуковых механических колебаний в зону сварки;
 - для фиксации образцов-пластин в процессе сварки;
 - для выполнения растяжения сварного соединения.
2. Спроектировали и изготовили образцы пластин из полипропилена марки Бален в количестве 130 шт.
3. На специальном стенде, созданном на базе универсального фрезерного станка модели FHV-50PD, осуществили ультразвуковую сварку плоских образцов-пластин из полипропилена марки Бален с целью создания образцов сварных соединений.
4. Выполнили измерения глубин внедрения рабочего торца волновода в материал пластмассы.
5. Выполнили исследования на растяжение образцов сварного соединения с измерением силы отрыва пластин друг от друга на ИМ Инстрон 5966 с записью диаграмм «нагрузка-деформация».
6. Провели статистическую обработку результатов измерений при помощи программ «Excel», «Mathcad», «Статистика».
7. Выполнили статистический анализ полученных экспериментальных данных.

Научная новизна работы.

Экспериментально рассмотрен процесс постепенного внедрения колеблющего рабочего торца СИ в полипропилен до предельной глубины,

равной общей толщине свариваемых пластин; определены адекватные регрессионные модели статистических зависимостей влияния времени воздействия ультразвука на глубину внедрения рабочего торца СИ в полипропилен и на силу разрыва сварного соединения.

Определены статистические закономерности между временем воздействия УЗ-ых колебаний на зону сварки и:

- силой отрыва сваренных пластин друг от друга,
- глубиной внедрения сварочного инструмента в материал,
- площадью контакта в сварном соединении.

Практическая и научная значимость исследования.

Основные положения проведенного исследования могут лечь в основу дальнейших теоретических разработок. Были найдены аналитические оценочные функции зависимости силы отрыва и глубины внедрения торца СИ в полипропилен от времени воздействия ультразвука на зону сварки. Результаты диссертации могут быть использованы в различных расчетах для исследования свойств пластмассовых материалов при ультразвуковой сварке.

Достоверность и обоснованность результатов исследования обеспечивались учетом ряда факторов:

- идентичность изготовления пластмассовых образцов в соответствии с разработанным чертежом;
- контроль условий изготовления сварных соединений (усилие прижима, частота УЗ колебаний, время сварки, надежная фиксация для исключения сдвига);
- соблюдение времени кондиционирования образцов после изготовления по ГОСТ Р 55142;
- адекватность методов исследования целям и задачам исследования, погрешность, точность выбранных СИ подходит для проведения измерений;
- измерения образцов проводились поверенными средствами измерения;
- обеспечение стандартных условий кондиционирования и испытания образцов перед испытаниями и условия испытаний соответствовали

требованиям стандартной атмосферы для испытаний пластмасс для всех серий измерений;

- обеспечением одинаковых условий испытаний для всех серий - образцы сварных соединений испытывались на одной испытательной машине при одной скорости движения подвижной траверсы, одним оператором;

- большой выборкой образцов - изготовлены 130 образцов-пластин. Из которых созданы и испытаны 65 образцов сварных соединений;

- проведением качественного и количественного анализа полученных экспериментальных данных;

- применением статистической обработки полученных результатов измерений на основе информационных технологий с использованием компьютерных программ, по ГОСТ 14359;

- применением методов эмпирических исследований, проведением корреляционно-регрессионного анализа полученных экспериментальных данных.

В результате проведенного исследования мы доказали выдвинутую нами гипотезу о том, что между временем воздействия УЗ-ых колебаний на зону сварки и прочностью сварного соединения полипропиленового материала имеется значимая возрастающая зависимость.

Список используемой литературы

1. Основы физики и химии полимеров/ Под ред. В.Н. Кулезнева. М.: Высшая школа, 1977. 247 с.
2. Э.Л.Калинчев, М.Б.Саковцева. Выбор пластмасс для изготовления и эксплуатации изделий: Справ. Изд. Л.: Химия, 1987. 416 с.
3. Нарисава И. Прочность полимерных материалов.: М.: Химия: 1987. 400 с.
4. Свойства пластмасс [Электронный ресурс]. URL: https://e-plastic.ru/slovar/c/ctepen_polimerizaskii/ (дата обращения 23.12.2021).
5. Волченко В.Н. Сварка и свариваемые материалы т.1. -М. 1991.
6. Виды пластмасс [Электронный ресурс]. URL: https://www.autowelding.ru/publ/1/1/plastmassy_poluchenie_plastmass_sostav_svojs_tva_svarivaemost/2-1-0-349 (дата обращения 16.09.2021).
7. Тагер А.А. Физикохимия полимеров. 3-е изд., переработанное. М., Химия, 1978.
8. В.К.Завгородний, Э.Л. Калинчев, Е.Г.Махаринский. Оборудование предприятий по переработке пластмасс, изд. «Химия», Л., 1972, стр. 464, рис. 263, табл. 34.
9. 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.
10. Лебедев Г.А. "Напыление. Сварка. Склеивание".
11. Сварочное оборудование [Электронный ресурс]. URL: https://www.autowelding.ru/publ/1/1/svarka_plastmass_ultrazvukom/2-1-0-231 (дата обращения 12.12.2021).
12. Волков С.С. и др. Сварка пластмасс ультразвуком/ С.С. Волков, Ю.Н. Орлов, Б.Я. Черняк. М., Химия, 1974. 264 с.: ил.
13. Способ ультразвуковой сварки деталей. из термопластов. Патент СССР 1384395. Патент SU1384395A1 METHOD OF ULTRASONIC WELDING OF

PARTS MADE OF THERMOPLASTIC MATERIALS. Applicants SHAKHTINSKI TEKH INST [SU]. Inventors POVALYAEV VLADIMIR A [SU]; BEKMURZAEV LEMA A [SU]; BAJRAMUKOVA NATALYA S [SU]; VOLKOV STANISLAV S [SU]. Classifications IPC B29C65/08; B29C65/10; (IPC1-7): B29C65/10. Publication SU1384395A1·1988-03-30.

14. ГОСТ 26996-86 Полипропилен и сополимеры пропилена. Технические условия. (с изменениями №№1,2). М.: ИПК Издательство стандартов, 2022.

15. ГОСТ 12423-2013 МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. ПЛАСТМАССЫ. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб). М.: Стандартиформ, 2014.

16. ГОСТ 11262-2017 МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. Пластмассы. Метод испытаний на растяжение. М.: Стандартиформ, 2018.

17. ГОСТ Р 56911-2016/EN 12317-2:2010 НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ МАТЕРИАЛЫ КРОВЕЛЬНЫЕ И ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ГИБКИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ (ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЕ И ЭЛАСТОМЕРНЫЕ). Метод определения прочности на сдвиг сварного и клеевого соединений. Стандартиформ, 2019.

18. Сергеев А.Г. Метрология: Учебник. - М.: Логос, 2004. - 287 с.

19. ГОСТ 14359-1969. ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР. ПЛАСТМАССЫ. Методы механических испытаний. Общие требования. М.: Издательство стандартов, 1993.

20. Бараз В.Р. Корреляционно-регрессивный анализ связи показателей коммерческой деятельности с использованием программы Excel: учебное пособие. – Екатеринбург : ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2005.- 103с.

21. А.Н. Котеров, Л.Н. Ушенкова, Э.С. Зубенкова, М.В. Калинина, А.П. Бирюков, Е.М. Ласточкина, Д.В. Молодцова, А.А. Вайнсон. 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.

22. Бараз В.Р. Применение программы Excel для статистических расчетов в материаловедении: учебное пособие. - Екатеринбург : ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – 46 с.
23. ГОСТ 32794-2014 МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. КОМПОЗИТЫ ПОЛИМЕРНЫЕ. М.: Стандартиформ, 2015.
24. Описание типа средства измерений системы для измерений параметров испытаний серии 5900. Приложение к свидетельству № 38881 об утверждении типа средства измерений.
25. Instron Двухколонные испытательные рамы настольного типа серии 5960. Руководство оператора. M10-16247-RU Редакция В.
26. Описание типа средства измерений системы для штангенциркулей торговой марки «Калиброн». Приложение к свидетельству № 76278 об утверждении типа средства измерений.
27. Описание типа средства измерений системы для индикаторов ИЧ и ИЧЦ. Приложение к свидетельству № 62552 об утверждении типа средства измерений.
28. Сварка пластмасс. [Электронный ресурс]. URL: https://studbooks.net/1423579/tovarovedenie/osnovnye_vidy_osobennosti_svarki_plastmass (дата обращения 13.12.2021).
29. Волков С. С., Орлов Ю. Н., Астахова Р. Н., Сварка и склеивание пластмасс. М., 1972. - 398 с.
30. Лекки Б. Сварка пластмасс: основы. [Электронный ресурс]. URL: www.omnexus.com (дата обращения 22.04.2022).
31. Николаев Г. А., Ольшанский Н. А., Новые методы сварки металлов и пластмасс. М., 1966. - 220 с.
32. Тростянская Е. Б., Комаров Г. В., Шишкин В. А., Сварка пластмасс. М., 1967. - 365 с.
33. Теоретические основы сварки/Под ред. В.В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1970. 692 с.: ил.

34. Тростянская Е.Б. и др. Сварка пластмасс/Е.Б. Тростянская, Г.В. Комаров, В.А. Шишкин. – М.: Машиностроение, 1967, 252 с.: ил.
35. Волков С.С. и др., Сварка и склеивание пластмасс/С.С. Волков, Ю.Н. Орлов, Р.Н. Астахова. М.: Машиностроение, 1972. 128 с.: ил.
36. Зайцев К.И., Мацюк Л.Н. Сварка пластмасс. М.: Машиностроение, 1978. 224 с.: ил.
37. Обзор мировой полимерной индустрии [Электронный ресурс]. URL: https://polyprofi.ru/blogs/Blog_Poly_and_Pro/obzor-mirovoy-polimernoy-industrii.php (дата обращения: 15.07.2021).
38. 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).
39. Ультразвуковая сварка [Электронный ресурс]. URL: Kirkland, Т. Ultrasonic Welding: The Need for Speed Control/ Т. Kirkland - Plastics Decorating, 2012 (дата обращения: 22.04.2022).
40. Волков С.С., Яматов Р.Г. Применение пластмасс в машиностроении. М. 1979. № 17 С.41-48. (Тр. МВТУ им. Н.Э.Баумана).
41. Ультразвуковая сварка при изготовлении одежды/И.Д.Клеткин, Н.В.Крючков, Р.Ф.Морева и др. М.: Легк. Индустрия. 1979. 335 с.: ил.
42. Гуль В.Е., Кулезнев В.Н. Структура и механические свойства полимеров. 3-е изд. М.: Высшая школа. 1972. 352 с.: ил.
43. Контроль качества сварки/Под ред. В.Н. Волченко. М.: Машиностроение. 1975. 328 с.: ил.
44. Балабина Г.В., Истратов И.Ф. Контроль качества сварных соединений из пластмасс в строительстве. М.: Стройиздат. 1975. 196 с.: ил.
45. 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).

46. 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).

47. Учебные пособия, диаграммы рассеяния [Электронный ресурс]. URL: Tutorials/SCATTER/scatterplots/effect.htm. Address data 2019.01.29. (дата обращения: 06.05.2022).

48. Интерпретация величин коэффициентов корреляции [Электронный ресурс]. URL: Hemphill 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).

49. Е.Б. Савина, А.Ю. Юхнович. «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.

50. Е.Б. Савина, С.В. Мурашкин. «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.

Приложение А

Результаты первичных измерений, диаграммы «нагрузка-перемещение» и вид образцов после испытаний на растяжение

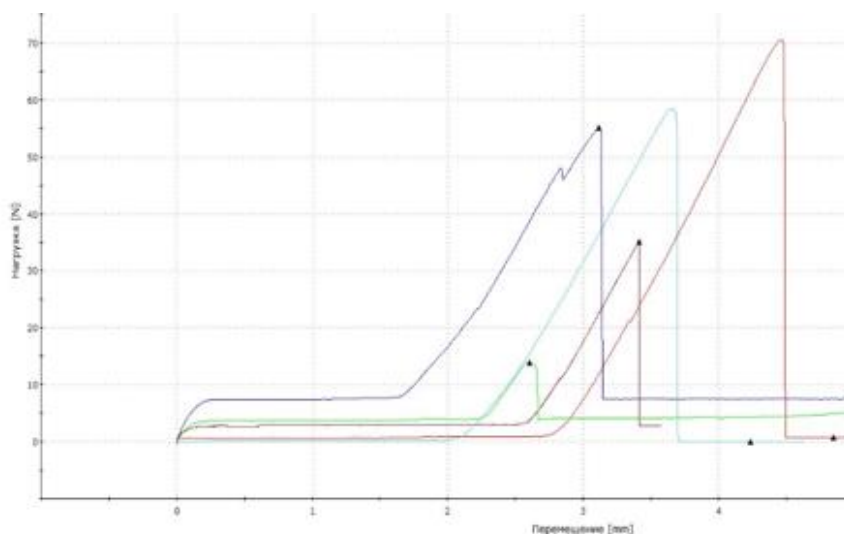


Рисунок А.1 – Диаграмма «нагрузка-перемещение» образцов серии № 1

Таблица А.1 – Результаты испытаний образцов серии № 1

	Нагрузка при пределе прочности, [N]	Перемещение при пределе прочности, [mm]	Вид образцов после испытания
1	70,49494	4,46040	
2	35,02648	3,41424	
3	13,91375	2,60358	
4	58,53351	3,66199	
5	55,04504	3,11941	

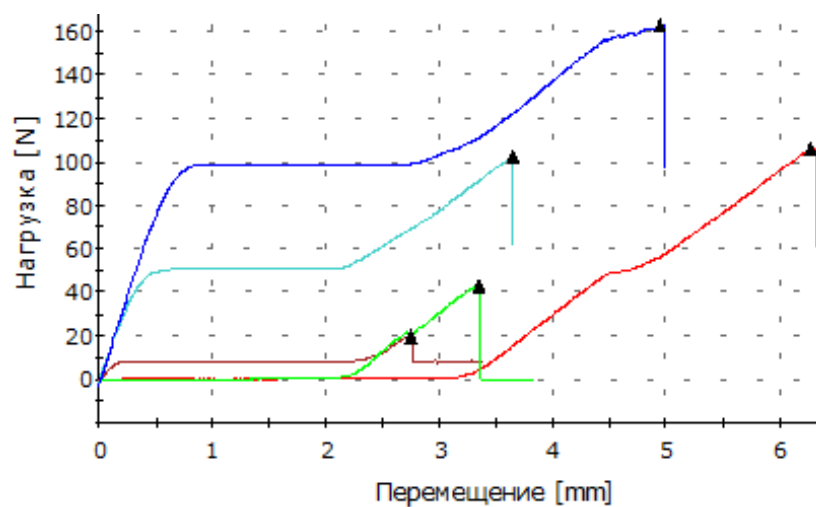



Рисунок А.2 – Диаграмма «нагрузка-перемещение» образцов серии № 2

Продолжение Приложения А

Таблица А.2 – Результаты испытаний образцов серии № 2

	Нагрузка при пределе прочности, [N]	Перемещение при пределе прочности, [mm]	Вид образцов после испытания
1	105,99207	6,27376	
2	19,79583	2,74749	
3	42,73119	3,34744	
4	102,53775	3,64738	
5	162,44762	4,94744	

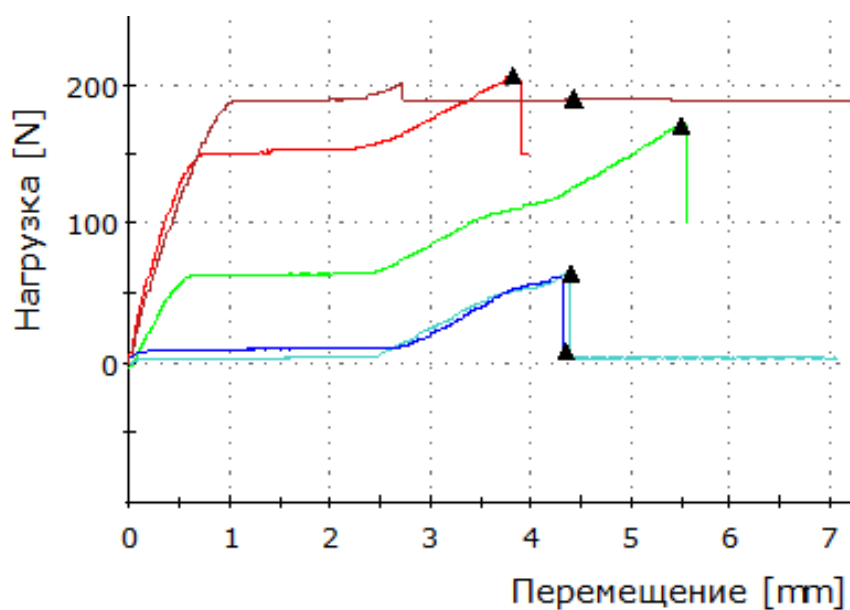



Рисунок А.3 – График «нагрузка-перемещение» образцов серии № 3

Таблица А.3 – Результаты испытаний образцов серии № 3

	Нагрузка при пределе прочности, [N]	Перемещение при пределе прочности, [mm]	Вид образцов после испытания
1	205,75233	3,84239	
2	200,21191	2,72550	
3	170,70746	5,51254	
4	64,16401	4,40594	
5	60,19840	4,26412	

Продолжение Приложения А

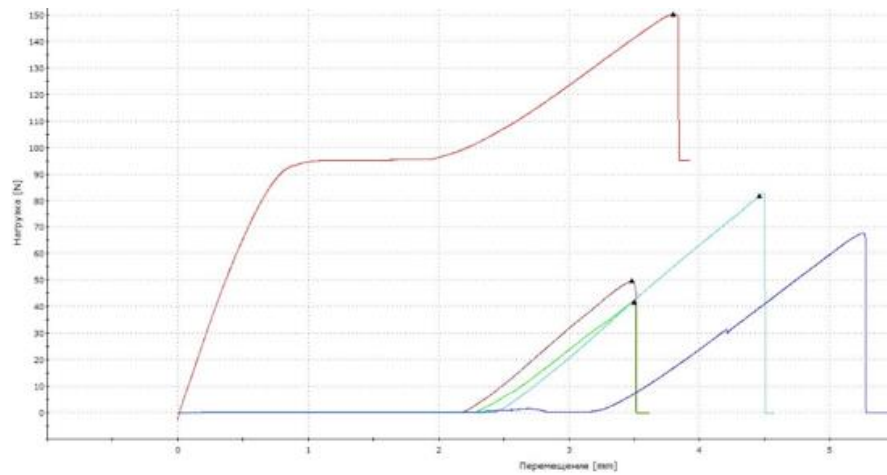


Рисунок А.4 – График «нагрузка-перемещение» образцов серии № 4

Таблица А.4 – Результаты испытаний образцов серии № 4

	Нагрузка при пределе прочности, [N]	Перемещение при пределе прочности, [mm]	Вид образцов после испытания
1	150,32539	3,80078	
2	49,70148	3,48410	
3	41,84058	3,50089	
4	81,84438	4,46415	
5	67,71612	5,25925	

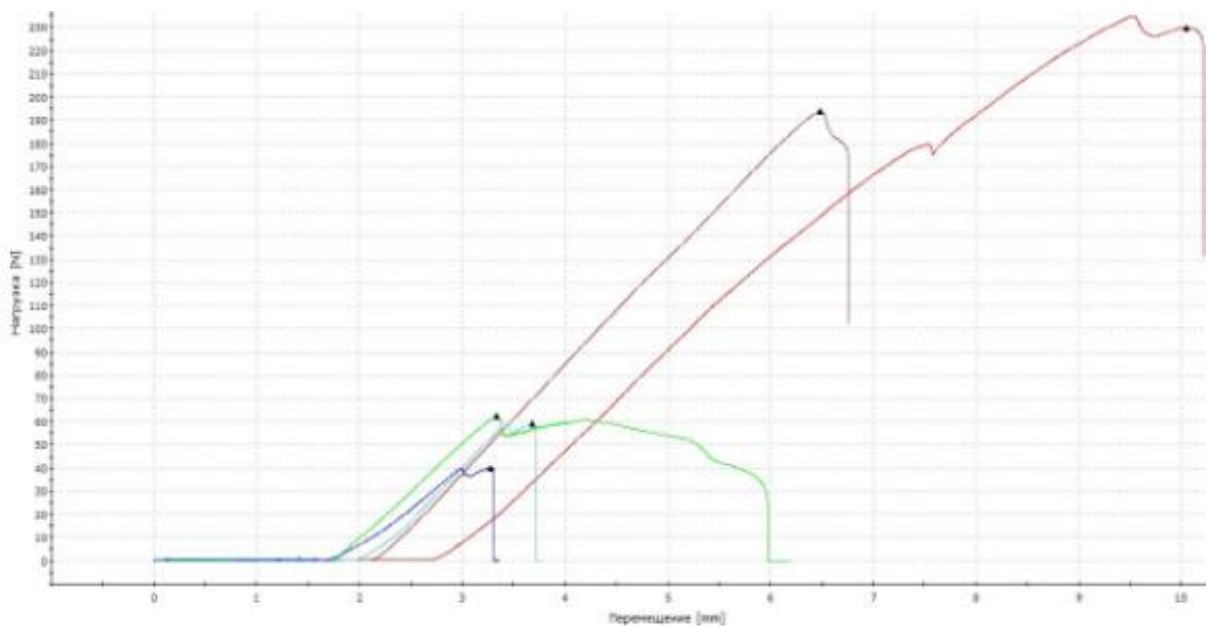



Рисунок А.5 – График «нагрузка-перемещение» образцов серии № 5

Продолжение Приложения А

Таблица А.5 – Результаты испытаний образцов серии № 5

	Нагрузка при пределе прочности, [N]	Перемещение при пределе прочности, [mm]	Вид образцов после испытания
1	234,88070	9,53590	
2	62,50000	6,48095	
3	193,65854	3,33759	
4	59,04847	3,68419	
5	39,98900	3,28089	

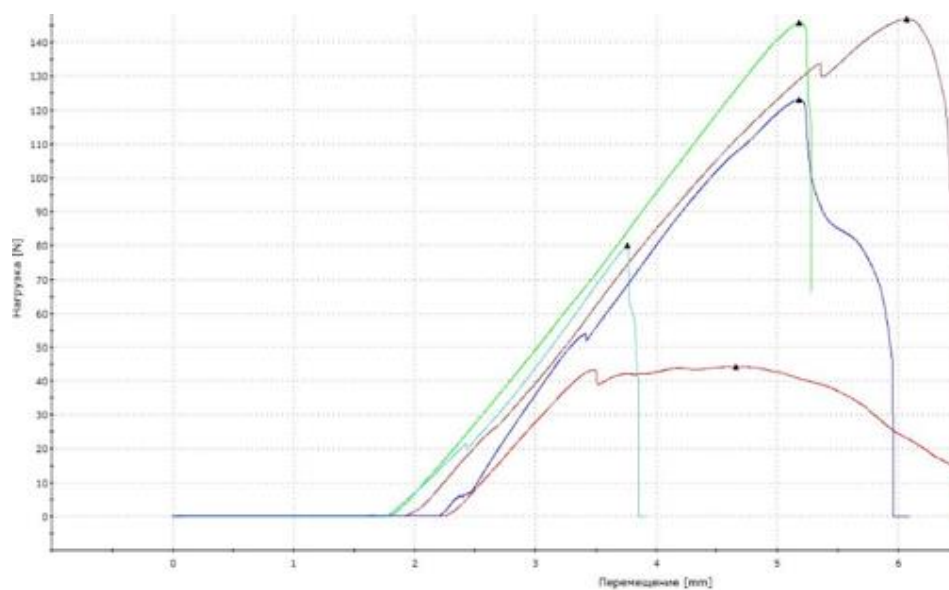



Рисунок А.6 – График «нагрузка-перемещение» образцов серии № 6

Таблица А.6 – Результаты испытаний образцов серии № 6

	Нагрузка при пределе прочности, [N]	Перемещение при пределе прочности, [mm]	Вид образцов после испытания
1	44,25510	4,66044	
2	146,80464	6,07263	
3	145,79289	5,18578	
4	79,96255	3,76432	
5	123,04853	5,18086	

Продолжение Приложения А

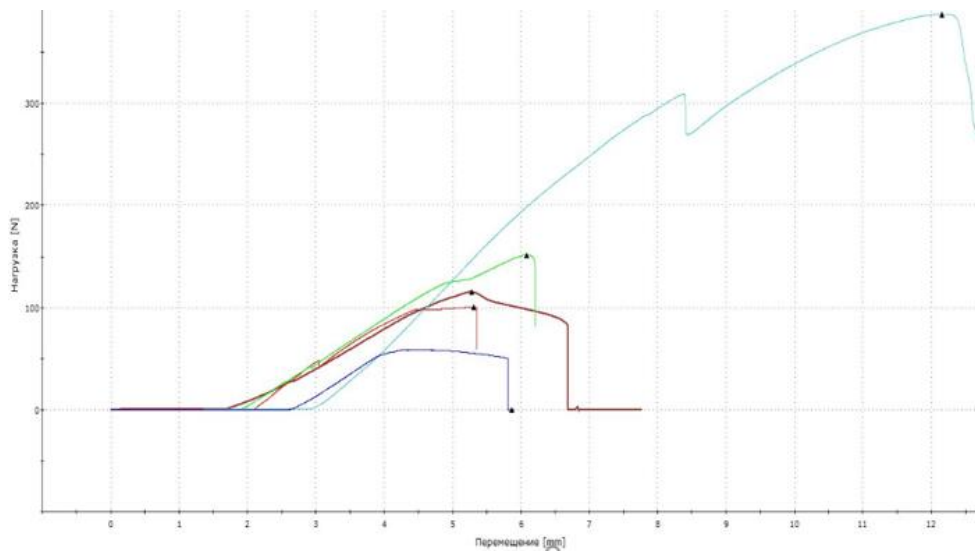


Рисунок А.7 – График «нагрузка-перемещение» образцов серии № 7

Таблица А.7 – Результаты испытаний образцов серии № 7

	Нагрузка при пределе прочности, [N]	Перемещение при пределе прочности, [mm]	Вид образцов после испытания
1	100,69076	5,31096	
2	115,03123	5,27599	
3	151,56648	6,08571	
4	387,13300	12,15261	
5	58,53423	4,48584	

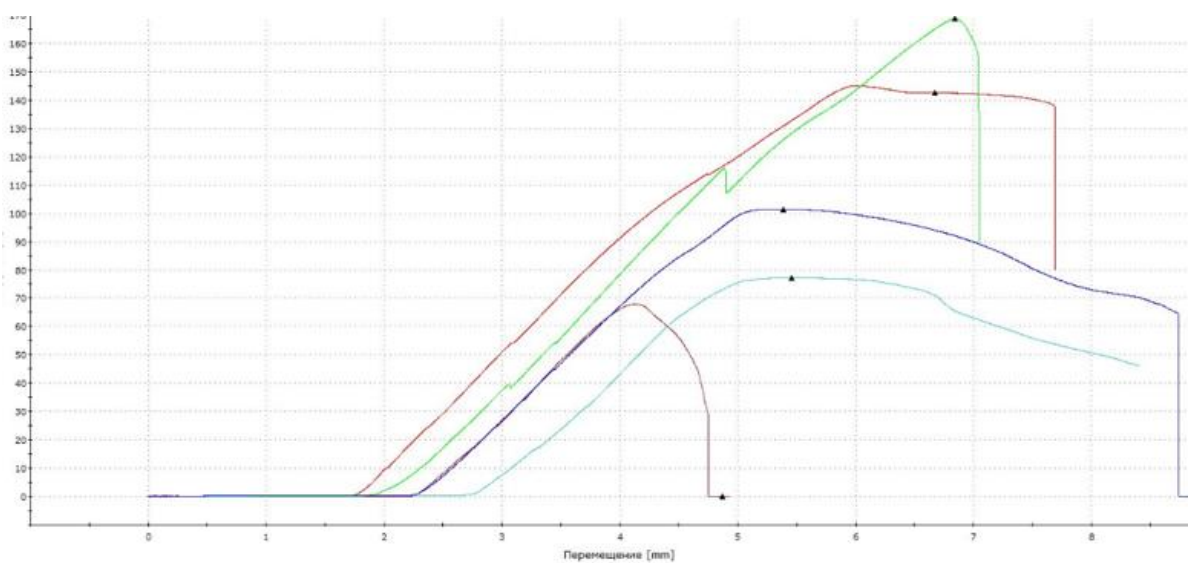


Рисунок А.8 – График «нагрузка-перемещение» образцов серии № 8

Продолжение Приложения А

Таблица А.8 – Результаты испытаний образцов серии № 8



	Нагрузка при пределе прочности, [N]	Перемещение при пределе прочности, [mm]	Вид образцов после испытания
1	145,09110	6,00914	
2	67,92900	4,12600	
3	168,70532	6,84409	
4	77,27305	5,46092	
5	101,40637	5,38927	

Таблица А.9 – Результаты испытаний образцов серии № 9

	Нагрузка при пределе прочности, [N]	Перемещение при пределе прочности, [mm]	Вид образцов после испытания
1	178,31058	9,97756	
2	134,83603	5,26592	
3	310,39764	8,64700	
4	160,26852	6,09252	
5	233,68368	5,72910	

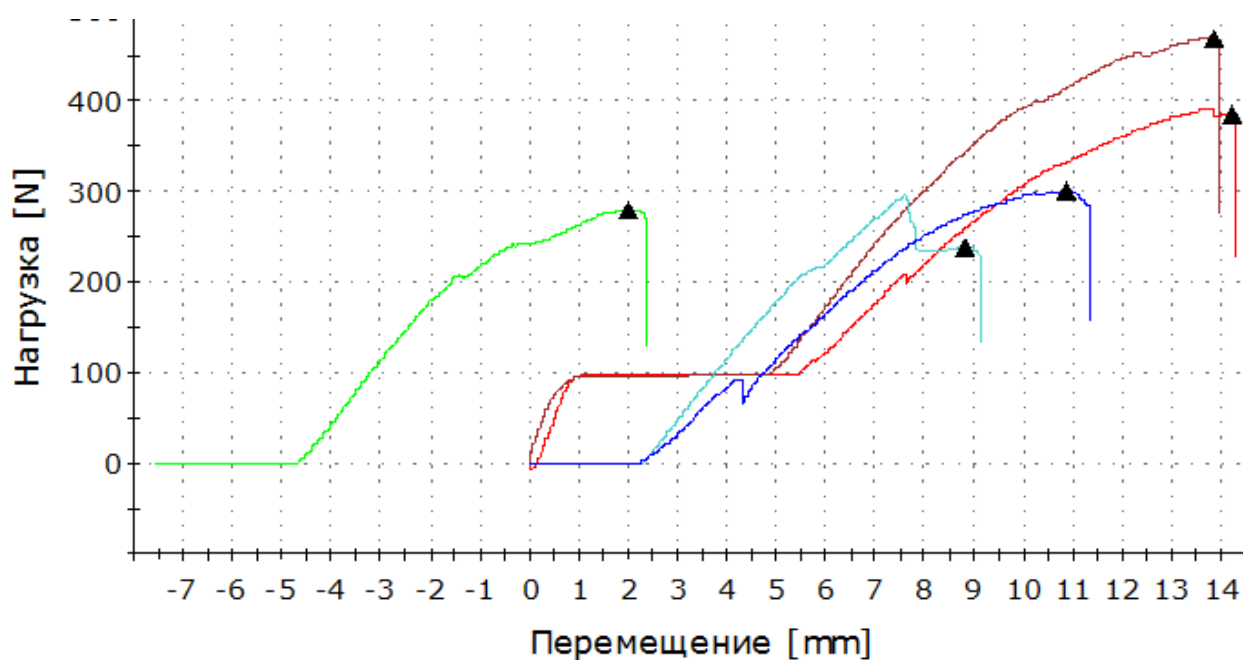



Рисунок А.9 – График «нагрузка-перемещение» образцов серии № 10

Продолжение Приложения А

Таблица А.10 – Результаты испытаний образцов серии № 10

	Нагрузка при пределе прочности, [N]	Перемещение при пределе прочности, [mm]	Вид образцов после испытания
1	390,45180	13,82932	
2	468,52100	13,82389	
3	279,45636	9,50123	
4	294,48883	8,83714	
5	298,97769	10,88381	

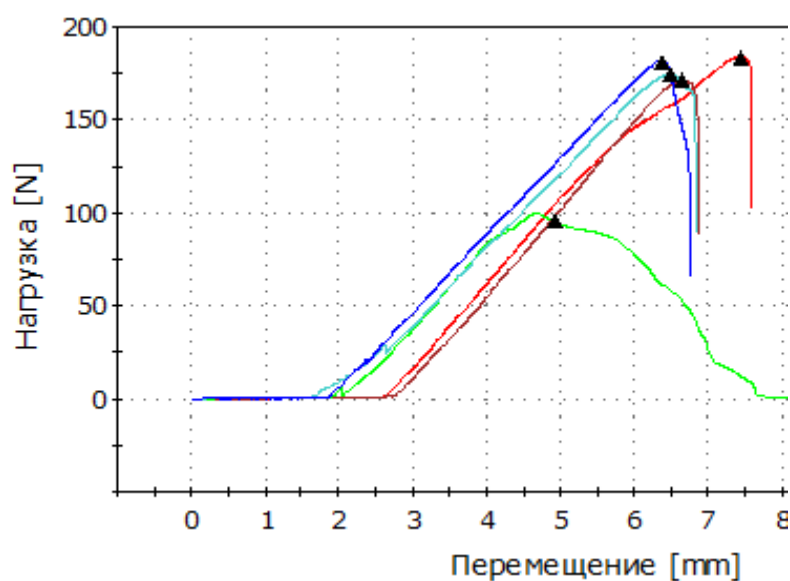



Рисунок А.10 – График «нагрузка-перемещение» образцов серии № 11

Таблица А.11 – Результаты испытаний образцов серии № 11

	Нагрузка при пределе прочности, [N]	Перемещение при пределе прочности, [mm]	Вид образцов после испытания
1	183,51295	7,45215	
2	170,74698	6,65403	
3	99,55850	4,67034	
4	174,28687	6,48754	
5	181,14146	6,36228	

Продолжение Приложения А

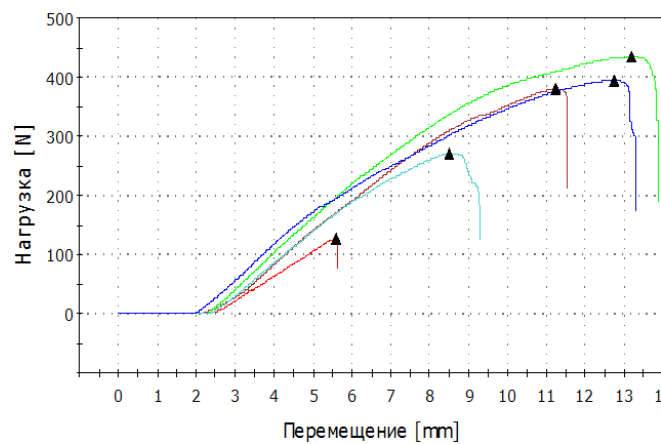


Рисунок А.11 – График «нагрузка-перемещение» образцов серии № 12

Таблица А.12 – Результаты испытаний образцов серии № 12

	Нагрузка при пределе прочности, [N]	Перемещение при пределе прочности, [mm]	Вид образцов после испытания
1	127,78106	5,59885	
2	380,20190	11,23268	
3	434,03049	13,17088	
4	270,65674	8,48756	
5	394,54617	12,72586	

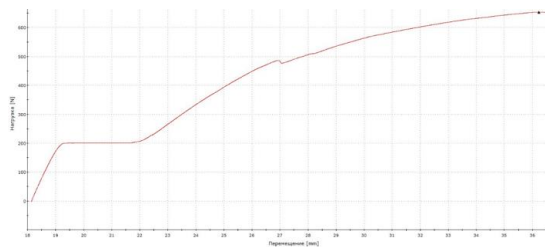


Рисунок А.12 – График «нагрузка-перемещение» образцов серии № 13








Таблица А.13 – Результаты испытаний образцов серии № 13

	Нагрузка при пределе прочности, [N]	Перемещение при пределе прочности, [mm]	Вид образцов после испытания
1	653,30646	36,23424	
2	346,33524	10,97432	
3	379,64420	11,06224	
4	441,09232	15,64256	
5	431,72906	13,95088	

Приложения Б







Результаты замеров сварных образцов

Таблица Б.1 - Результаты замеров сварных образцов полипропилена

№ образца	Время воздействия УЗ-сварки, с	Высота под сваркой, мм	Толщина сварного соединения, мм	Глубина погружения сварочного инструмента, мм	Внешний вид сварных образцов после испытаний
1	2	3	4	5	6
1.1	1,2	5,07	5,904	0,83	
1.2		5,10	5,921	0,82	
1.3		5,23	5,873	0,64	
1.4		4,81	5,812	1,00	
1.5		4,87	5,830	0,96	
2.1	1,4	4,61	5,801	1,19	
2.2		4,85	5,952	1,10	
2.3		4,78	5,891	1,11	
2.4		4,68	5,830	1,15	
2.5		4,81	5,869	1,06	
3.1	1,6	4,42	5,831	1,41	
3.2		4,60	5,911	1,31	
3.3		4,59	5,864	1,27	
3.4		4,64	6,002	1,36	
3.5		4,55	6,010	1,46	
4.1	1,8	4,12	5,820	1,70	
4.2		4,30	5,850	1,55	
4.3		4,73	5,889	1,16	
4.4		4,41	5,858	1,45	
4.5		4,34	5,851	1,51	
5.1	2,0	3,50	5,880	2,38	
5.2		3,22	5,880	2,66	
5.3		2,73	5,990	3,26	
5.4		3,61	5,885	2,28	
5.5		3,75	5,858	2,11	
6.1	2,2	3,22	5,827	2,61	
6.2		3,24	5,881	2,64	
6.3		2,93	5,899	2,97	
6.4		3,44	5,835	2,40	
6.5		3,42	5,855	2,44	
7.1	2,4	2,58	5,891	3,31	
7.2		2,»8	5,828	3,55	
7.3		2,66	5,876	3,22	
7.4		1,67	6,008	4,34	
7.5		2,80	5,877	3,08	

Продолжение Приложения Б

Продолжение таблицы Б.1

1	2	3	4	5	6
8.1	2,6	1,92	5,859	3,94	
8.2		2,73	5,860	3,13	
8.3		2,75	5,861	3,11	
8.4		2,83	5,869	3,04	
8.5		2,46	5,859	3,40	
9.1	2,8	1,81	5,891	4,08	
9.2		2,07	5,868	3,80	
9.3		1,25	6,084	4,83	
9.4		1,75	5,891	4,14	
9.5		2,05	5,978	3,93	
10.1	3,0	1,83	5,867	4,04	
10.2		0,88	6,155	5,28	
10.3		0,68	6,210	5,53	
10.4		1,12	6,345	5,23	
10.5		1,15	5,954	4,80	
11.1	3,2	1,51	5,958	4,45	
11.2		2,26	5,834	3,57	
11.3		2,59	5,858	3,27	
11.4		1,62	5,856	4,24	
11.5		1,61	5,849	4,24	
12.1	3,4	1,64	5,851	4,21	
12.2		1,24	6,099	4,86	
12.3		0,00	6,163	6,16	
12.4		1,64	6,029	4,39	
12.5		0,78	6,000	5,22	
13.1	3,6	0,00	5,985	5,99	
13.2		1,04	5,895	4,86	
13.3		0,73	6,024	5,29	
13.4		0,00	6,231	6,23	
13.5		1,06	6,040	4,98	

Приложение В

Результаты статистической обработки результатов испытания

Группа 1					Группа 2					Группа 3					Группа 4				
№ образца	Глубина, мм	Общая высота образца	Высота под сваркой	F, Н	№ образца	Глубина, мм	Общая высота образца	Высота под сваркой	F, Н	№ образца	Глубина, мм	Общая высота образца	Высота под сваркой	F, Н	№ образца	Глубина, мм	Общая высота образца	Высота под сваркой	F, Н
1.1	0,83	5,904	5,07	70,49	2.1	1,19	5,801	4,61	105,99	3.1	1,41	5,831	4,42	205,75	4.1	1,70	5,820	4,13	160,33
1.2	0,82	5,921	5,10	35,03	2.2	1,10	5,952	4,85	19,80	3.2	1,31	5,911	4,60	200,21	4.2	1,55	5,850	4,30	49,70
1.3	0,64	5,873	5,23	13,91	2.3	1,11	5,891	4,78	42,73	3.3	1,27	5,864	4,59	170,71	4.3	1,16	5,889	4,73	41,84
1.4	1,00	5,812	4,81	58,53	2.4	1,15	5,830	4,68	102,54	3.4	1,36	6,002	4,64	64,16	4.4	1,45	5,858	4,41	81,84
1.5	0,96	5,830	4,87	55,05	2.5	1,06	5,869	4,81	102,45	3.5	1,46	6,010	4,55	60,20	4.5	1,51	5,851	4,34	67,72
средн	0,85		5,02	46,60	средн	1,12		4,75	86,70	средн	1,36		4,56	140,21	средн	1,47	1,42	4,38	78,29
ст отк	0,141			22,29	ст отк	0,05			56,50	ст отк	0,07			72,48	ст отк	0,199	0,177		43,18
коэф.вариации				47,83	коэф.вариации				65,17	коэф.вариации				51,692	коэф.вариации				55,162
29,866																			
5.1	2,38	5,880	3,50	234,88	6.1	2,61	5,827	3,22	44,26	7.1	3,31	5,891	2,58	100,69	8.1	3,94	5,859	1,92	145,09
5.2	2,66	5,880	3,22	62,80	6.2	2,64	5,881	3,24	146,80	7.2	3,55	5,828	2,28	115,03	8.2	3,13	5,860	2,73	67,93
5.3	3,26	5,990	2,73	193,66	6.3	2,97	5,899	2,93	145,79	7.3	3,22	5,876	2,66	151,57	8.3	3,11	5,861	2,75	168,71
5.4	2,28	5,885	3,61	59,05	6.4	2,40	5,835	3,44	79,96	7.4	4,24	6,008	1,62	174,29	8.4	3,04	5,869	2,83	77,27
5.5	2,11	5,858	3,75	39,99	6.5	2,44	5,855	3,42	123,05	7.5	3,08	5,877	2,80	58,53	8.5	3,40	5,859	2,46	101,41
средн	2,54		3,36	118,02	средн	2,61		3,25	107,97	средн	3,50	3,29	2,40	162,59	средн	3,32		2,54	112,08
ст отк	0,45			89,48	ст отк	0,23			44,75	ст отк	0,50	0,38		35,20	ст отк	0,37			43,51
коэф.вариации				75,82	коэф.вариации				41,445	коэф.вариации				79,87	коэф.вариации				36,13
38,82																			
9.1	4,08	5,891	1,81	178,31	10.1	4,04	5,867	1,83	390,45	11.1	4,45	5,96	1,51	183,51	12.1	4,21	5,851	1,64	127,78
9.2	3,80	5,868	2,07	134,84	10.2	5,28	6,155	0,88	468,52	11.2	3,57	5,83	2,26	170,75	12.2	4,86	6,099	1,24	380,20
9.3	4,83	6,084	1,25	210,40	10.3	5,53	6,210	0,68	279,46	11.3	2,27	5,86	2,56	99,66	12.3	6,16	6,163	0,00	434,03
9.4	4,14	5,891	1,75	160,27	10.4	5,23	6,345	1,12	294,49	11.4	4,24	5,86	1,62	174,29	12.4	4,39	6,029	1,64	270,66
9.5	3,93	5,978	2,05	233,68	10.5	4,80	5,954	1,15	298,98	11.5	4,24	5,85	1,61	181,14	12.5	5,22	6,000	0,78	394,55
средн	4,16	3,99	1,79	203,50	средн	4,97		1,13	346,38	средн	3,95	4,124	1,92	161,85	средн	4,97		1,06	321,44
ст отк	0,40	0,15		69,92	ст отк	0,59			81,05	ст отк	0,50	0,38		35,20	ст отк	0,78			124,05
коэф.вариации				34,36	коэф.вариации				23,40	коэф.вариации				21,747	коэф.вариации				38,59
23,71																			
13.1	6,99	5,085	0,00	663,31	13.2	4,86	5,895	1,04	346,34	13.3	5,29	6,024	0,73	379,64	13.4	6,23	6,231	0,00	441,09
13.5	4,98	6,040	1,06	431,73	13.5	4,98	6,040	1,06	431,73										
средн	5,47	5,340	0,57	450,42	ст отк	0,611	0,138		119,84										
44,681																			

Рисунок В.1 – Статистическая обработка результатов испытания в программе Excel

Пример статистической обработки по ГОСТ 14359.

Получены индивидуальные значения величины силы F отрыва: 653,31 346,34 379,64 441,09 431,73. Расположим значения по возрастанию: 346,34 379,64 431,73 441,09 653,31 и исключим 653,31 и 346,34, как сомнительные.

Найдем среднее арифметическое значение оставших значений по формуле (1): $F_{1cp} = 417,49$.

Значение стандартного отклонения определяем по формуле (2): $S_1 = 33,11$.

Продолжение Приложения В

Значение вероятного отклонения искомого показателя F от полученного среднего значения вычисляем по формуле (3):

$$\Delta x = 4,303 \cdot 33,11 / \sqrt{3} = 82,25,$$

где $t = 4,303$ – t-критерий при $N=3$ взят из приложения 2 ГОСТ 14359.

Границы доверительного интервала $2\Delta x$, в которых заключено искомое значение показателя X, определяем по формулам (4) и (5):

$$\text{верхняя граница } 417,49 + 82,25 = 499,74,$$

$$\text{нижняя граница } 417,49 - 82,25 = 335,24.$$

Надёжные значения находятся в интервале от 335,24 до 499,74 Н. Сомнительная величина 346,34 Н достаточно надёжна и её следует включить в расчёт. Сомнительная величина 653,31 Н не входит в расчетный доверительный интервал.

Окончательное среднее значение по формуле (1): $F_{\text{ср.}} = 399,70$ Н.

Значение стандартного отклонения по формуле (2): $S = 44,68$.

Величина вероятного отклонения искомого показателя по формуле (3):

$$\Delta x = 3,182 \cdot 44,68 / \sqrt{3} = 71,09,$$

где $t = 3,182$ – t-критерий при $N=4$, взят из приложения 2 ГОСТ 14359.

Коэффициент вариации вычисляется по формуле (7): $V = 11,18$ %.

Относительная ошибка вычисляется по формуле (8): $\varepsilon = 17,8$ %.

Аналогично проводится статистическая обработка всех полученных результатов испытания. Окончательные средние значения экспериментальных данных представлены в таблице 6. Далее переходим к анализу экспериментальных данных (п.6.4).