

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

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

22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки)

Гибридные и комбинированные технологии обработки и  
модификации перспективных материалов

(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Влияние усилия прижима волновода на прочность соединения  
при ультразвуковой сварке полипропилена

Обучающийся

Д.А. Сидоров

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный

к.т.н., доцент, Е.Н. Почекуев

руководитель

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

Консультанты

к.т.н., с.н.с., С.В. Мурашкин

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

м.н.с., Н.Г. Спиридонов

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

к.т.н., директор ИнМаш., А.С. Селиванов

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

Тольятти 2025

## Оглавление

Введение.....	3
1 Общие сведения о пластмассах .....	6
2 Виды и методы сварки пластмасс .....	13
3 Основы ультразвуковой сварки полимеров .....	20
4 Методы оценки качества сварных соединений полимеров.....	26
5 Экспериментальная часть .....	30
5.1 Материал исследования .....	30
5.2 Выбор метода эксперимента .....	32
5.3 Изготовление и сварка образцов.....	40
5.4 Испытание образцов.....	49
6 Обработка экспериментальных данных .....	54
6.1 Представление и анализ первичных данных.....	54
6.2 Статистическая обработка результатов эксперимента .....	68
6.3 Определение усилий, действующих на РЧСИ в процессе УЗС .....	71
6.4 Построение статистических зависимостей .....	75
6.4.1 Корреляционный анализ результатов .....	75
6.4.2 Регрессионный анализ результатов.....	81
6.4.3 Анализ остатков регрессионных моделей .....	89
7 Стабилизация прочности сварных соединений .....	93
Заключение .....	98
Список используемой литературы и используемых источников.....	103
Приложение А Фото образцов после УЗС и механических испытаний .....	106
Приложение Б Статистический анализ результатов .....	110

## Введение

Актуальность и научная значимость нашего исследования подтверждаются значительной потребностью в решении вопросов, связанных с изучением различных факторов, оказывающих влияние на прочность сварных соединений материалов из пластмасс. Не зависимо от конкретных изделий в процессе работы этих материалов высоко ценится ее прочность и долговечность. Соблюдая определенные требования на стадии проектирования можно изготавливать детали высшего качества по уровню безопасности и долговечности [26]. По изучению свойств пластмассовых изделий в настоящее время проходят активные исследования. Несмотря на широкое распространение и интенсивное изучение полимерных материалов, их свойства и поведение остаются недостаточно исследованными в ряде аспектов. Исследование факторов на прочностные характеристики пластмассовых изделий имеют поистине обширный интерес к их изучению

Следует отметить, что полимерные материалы играют существенную роль в современном обществе, во-второй половине XX века их популярность приняла высокий приоритет в нашем мире [26]. Во всех отраслях промышленности изделия из пластика нашли широкое применение, начиная с одноразовой посуды, упаковок и заканчивая производством деталей машин, кораблей, самолётов, трубопроводов и т.д. Пластик по большей части вытесняет такие материалы как стекло, дерево, металл и бумагу [26].

Полимерные материалы, как правило, поставляются в виде гранул, которые подвергаются различным технологическим процессам, таким как экструзия, литье под давлением и другие, что позволяет формировать изделия из полимеров практически любой заданной геометрической формы посредством механического воздействия [26].

Пластик применяется в различных отраслях благодаря своим уникальным свойствам и преимуществ: легкость, прочность, долговечность, гибкость, непроницаемость, электрическая изоляция, теплоизоляция,

устойчивость к химическим воздействиям т.д. В зависимости от сложности формы изготавливаемого изделия на одно изделие может затрачиваться от нескольких секунд до нескольких часов благодаря автоматизации производства [26].

Сварка термопластов влияет на процесс создания неразборного соединения между двумя или более термопластичными материалами за счет контакта раскаленных поверхностей, прижатия этих нагретых поверхностей и охлаждения соединённых поверхностей для фиксации соединения [26].

Как следует из исследований, представленных в работах [26, 31, 19, 10], процесс сварки полимеров сопровождается сближением макромолекул на расстояния, при которых начинают проявляться силы межмолекулярного взаимодействия, такие как силы Ван-дер-Ваальса. Эти силы действуют на расстояниях порядка 3–4 Å. Сближение макромолекул обусловлено активацией их звеньев, которая выражается в увеличении энергии теплового движения (флуктуаций). Под воздействием внешней нагрузки и теплового воздействия происходит разогрев и последующее соединение макромолекул, что обеспечивает формирование прочного сварного шва. Данный процесс является ключевым для достижения высокой адгезии и механической прочности соединения полимерных материалов [26, 31, 19, 10].

В исследованиях как правило, указывается глубина проплавления до границы свариваемых деталей. Однако расплав течет на большую глубину проникновения, и этот процесс не получил всестороннего изучения. Исследование этих процессов, происходящих в зоне УЗС влияют на адгезию активированных поверхностей и, следовательно, на прочность сварных пластиковых соединений [26].

Гипотеза: существует положительная корреляция между величиной усилия прижима рабочей части сварочного инструмента (РЧСИ) к свариваемым деталям и прочностью формируемого сварного соединения. Что обусловлено увеличением межмолекулярных взаимодействий за счет повышения степени контакта активированных макромолекул полипропилена.

Цель работы – увеличение ресурса работы сварного соединения полипропилена за счет стабилизации прочности соединения путем оптимизации усилия прижима РЧСИ к свариваемым деталям.

Задачи:

- проанализировать существующие методики и выбрать подходящую для проведения эксперимента;
- изготовить оснастку и экспериментальные образцы из полипропилена марки «Бален» для исследования;
- выполнить сварку образцов из полипропилена, варьируя нагрузку в месте контакта рабочей части сварочного инструмента (РЧСИ) с материалом;
- провести группы испытаний для оценки прочностных свойств сваренных образцов;
- провести статистическую обработку результатов измерений и определить влияние приложенной нагрузки на прочность сварного соединения путем выполнения регрессионного анализа;
- выполнить анализ статистической зависимости «прочность сварного соединения от усилия прижима РЧСИ к свариваемым деталям».

## 1 Общие сведения о пластмассах

Пластмасса – материал, состоящий из высокомолекулярных соединений полимеров, который может принимать и сохранять различной сложности формы под воздействием температуры и давления. Пластмассы главным образом состоят из повторяющихся структурных единиц – макромолекул, которые в свою очередь состоят из небольших молекул – мономеров.

Макромолекулы – это огромные молекулы, состоящие из низкомолекулярных соединений повторяющимися  $n$  – ное количество раз, в которых не менее тысячи атомов связаны между собой ковалентными связями [20]. Они могут выглядеть как цепи или сети, разветвлённые между собой. Синтетические макромолекулы имеют относительно простую структуру, поскольку состоят из одинаковых конституционных повторяющихся единиц (структурных единиц или мономеров). По этой причине их называют полимерами или же в простонародье – пластмассами.

Мономеры – молекулы небольшого размера, способные соединяться между собой во время процесса полимеризации, образуя более крупные структуры.

Структура полимера в частности будет принимать вид  $[-M-]_n$ , где  $M$  – это макромолекула соответствующего полимера, а  $n$  – количество звеньев мономера, называемое степенью полимеризации, так например, если  $n = 10...100$ , то такие вещества называются олигомерами [27].

Пластмассы обладают широким спектром свойств, в зависимости от своей химической природы и пространственной структуры макромолекул и при различных условиях могут иметь следующие свойства: гибкость и эластичность, прочность, долговечность, тепло- и электроизоляционные свойства, химическую стойкость, легкий вес, прозрачность и оптические свойства, биорезорбируемость (биологическую совместимость) и возможность вторичной переработки.

Получают полимеры несколькими известными способами:

Полимеризация – образование полимеров путем соединения или добавления мономерных единиц в длинные цепи. Этот процесс может осуществляться различными методами, включая радикальную полимеризацию, иницируемую светом или теплом, каталитическую полимеризацию, предложенную металлоорганическими соединениями, и другие методы, приводящие к образованию трехмерных полимерных сетей или линейных цепей полимеров.

Поликонденсация – процесс, приводящий к образованию полимеров путем высвобождения молекул воды или другого малого органического соединения. Этот процесс основан на последовательном соединении двух мономеров (реакция замещения) чередующимися химическими реакциями, такими как эстерификация или аминная группировка, с последующим образованием макромолекулярной структуры.

В работе [5] упоминается, что «в зависимости от степени полимеризации высокомолекулярных соединений, при увеличении длины полимерной пространственной цепи – происходит: повышение температуры плавления, повышение прочности и химической стойкости материала» [5].

Для регулирования способности полимеров к истиранию и электросопротивлению в их состав добавляют различные добавки (иные полимеры, эластомеры, пластификаторы, стабилизаторы и модификаторы) [26]. Все вышеперечисленное используется для улучшения свойств для получения полимеров [26].

Полимеры по своей структуре делятся точно так же, как и металлы на кристаллические и аморфные. Степень кристалличности (количество кристаллических фаз в структуре) характеризуют полимеры с кристаллической структурой. В процессе охлаждения расплавленного полимера, а собственно перехода полимера из вязко-текучего состояния в твердое, кристаллы начинают образовывать из растворенных веществ микроскопические многогранные ядра, называемые сферолитами (рисунок 1). Образование сферолитов может улучшить механические свойства полимера,

такие как прочность и жесткость, за счет улучшенной ориентации молекул внутри сферолитов. Эти структуры могут наблюдаться в различных полимерах, таких как полиэтилен и полипропилен, и их присутствие может быть ключевым фактором в технологии формования полимеров, влияя на свойства конечного материала. Изменяя скорость охлаждения, можно регулировать структуру, а, следовательно, свойства сварного соединения [21]

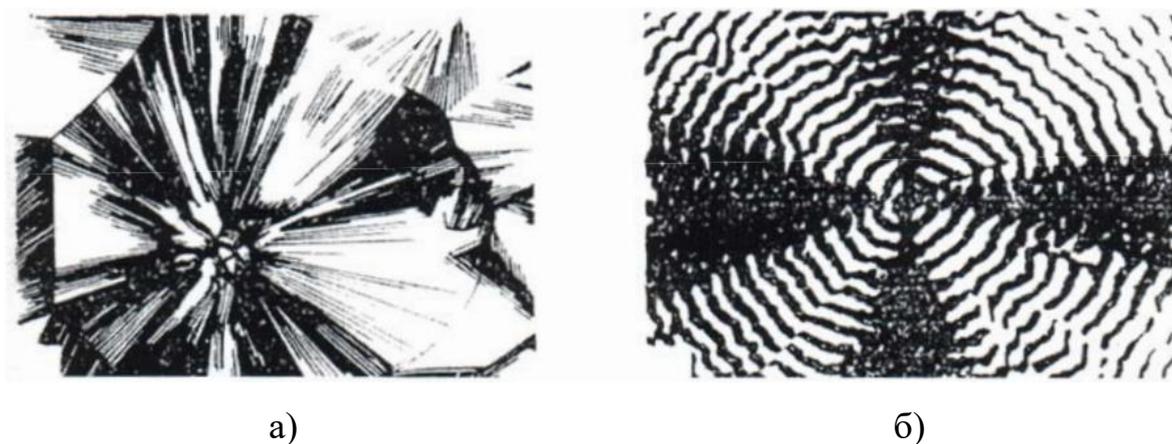


Рисунок 1 – Сферолиты а) полипропилена (радикальный), б) полиэтилена (кольцевой) [10]

Так как полимеры обладают высокой молекулярной массой, поэтому могут существовать только в твердом или жидком состоянии. Связано это с тем, что при достаточно высокой температуре кипения они обладают очень низкой температурой разложения, которой недостаточно для образования газообразного состояния.

На свойства полимера, помимо химической природы и пространственной структуры, оказывает большое влияние его фазовое состояние, которое оценивается температурой стеклования. Если полимер нагреваю выше температуры стеклования, то он становится состоянием повышенной эластичности (участок 2 рисунок 2) также это происходит и в обратную сторону. Поэтому температура стеклования прямо пропорциональна молекулярной массе тела. Переходы из одного состояния в другое являются технологическими характеристиками, которые очень важны

при переработке полимеров. Стоит отметить, что сварка полимеров может происходить только в вязко-текучем состоянии [32].

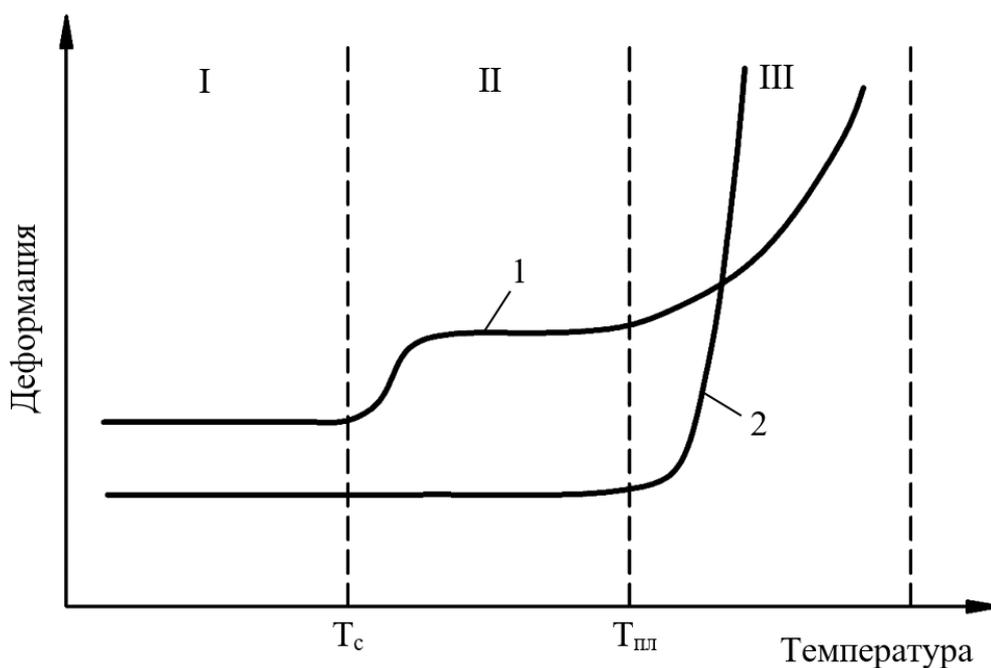


Рисунок 2 – Условная диаграмма поведения аморфного (1) и кристаллического (2) полимера на термомеханической кривой

Внешне, пластмассы представляют собой близкие к идеальной геометрической форме сферические и цилиндрические гранулы размерами 3...5 мм, разного цвета, все зависит от вида пластмассы и метода ее изготовления. В промышленности широко применяют термопластические полимеры, которые представляют собой класс полимерных материалов, подверженных повторной переработке и формовке при нагревании. Это отличает их от термореактивных полимеров, которые, однажды отвержденные, не могут быть растворены и переработаны.

Широкое использование полимеров связано с особенностью иметь высокую прочность в сочетании с обратимой деформацией [26, 31]. Исследования прочностных свойств металлов уже достаточно глубоко изучены, в то время как анализ прочности пластмасс все еще является предметом исследований, поскольку на нее влияет множество факторов.

«Среди факторов, влияющих на прочностные характеристики пластмасс, следует отметить структуру и конфигурацию полимера, процесс изготовления, тип и содержание наполнителя, а также время между изготовлением и испытанием образцов, а также процессы старения материала (температурные, воздействие света и другие факторы), а также внутренние дефекты» [31].

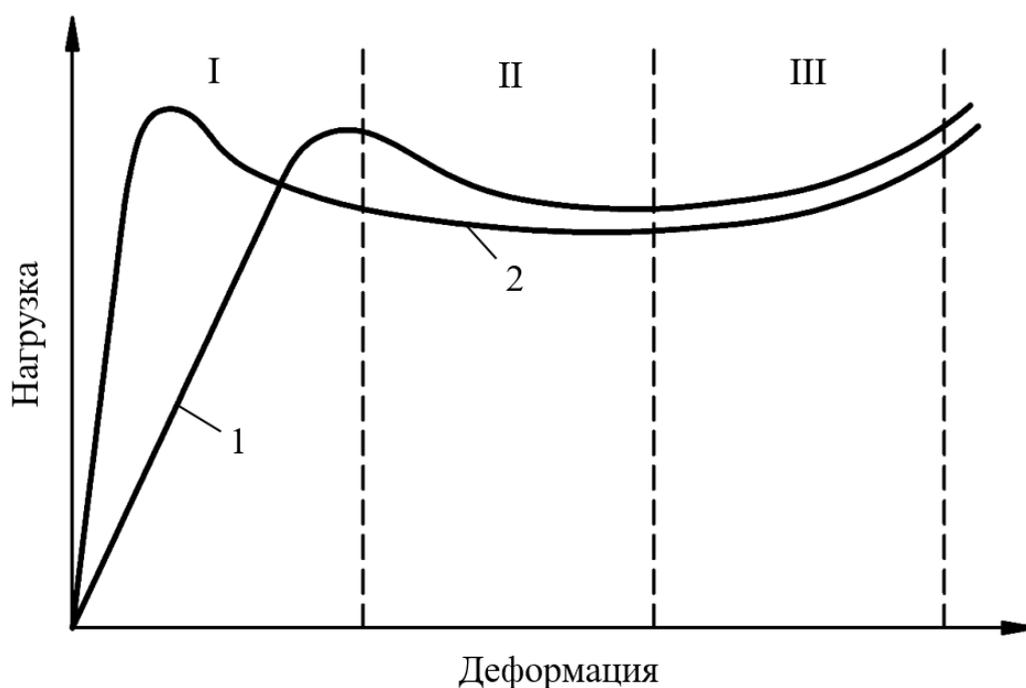


Рисунок 3 – Условные кривые деформации высококристаллизованного (1) и аморфного (2) полимера

Для оценка прочностных свойств существуют несколько техник где важно использование оборудование так и метод изготовления и обработки образцов использованием универсальной испытательной машины, что приводит к получению кривой «нагрузка-деформация», как показано на рисунке 3 (размер, толщина, условия испытания и обработки). При разрушении серии стандартизированных образцов определяют прочностные механические характеристики полимерных материалов. Ниже в таблице 1 представлены свойства и примеры применения наиболее распространенных пластмасс.

Таблица 1 – Характеристики и области применения пластмасс

Вид пластмассы	Химическая формула	Характерные свойства	Применение и изготавливаемые детали
ПЭ / PE	$(C_2H_4)_n$	Высокая химическая стойкость, гибкость, низкая стоимость, устойчивость к влаге	Пакеты, бутылки, трубы, контейнеры, упаковка, изоляция кабелей
ПП / PP	$(C_3H_6)_n$	Высокая термостойкость, химическая стойкость, прочность, легкий вес	Автомобильные детали, крышки для бутылок, медицинские изделия, трубы, упаковка, бытовая техника
ПВХ / PVC	$(C_2H_3Cl)_n$	Жесткость или гибкость (в зависимости от добавок), устойчивость к химикатам, огнестойкость	Окна, двери, трубы, изоляция проводов, напольные покрытия, пленки, медицинские изделия (например, трубки)
ПС / PS	$(C_8H_8)_n$	Жесткость, прозрачность, хрупкость, легкость в обработке	Одноразовая посуда, упаковка, корпуса бытовой техники, игрушки, пенопласт (вспененный полистирол)
ПА / PA	$(C_6H_{11}NO)_n$	Высокая прочность, износостойкость, термостойкость, низкий коэффициент трения	Шестерни, подшипники, корпуса инструментов, волокна для текстиля, детали автомобилей
АБС / ABS	$(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$	Ударопрочность, жесткость, устойчивость к химикатам, легкость в обработке	Корпуса электроники, автомобильные детали, игрушки (например, LEGO), бытовые приборы, трубы
ПК / PC	$(C_{16}H_{16}O_3)_n$	Высокая прочность, прозрачность, термостойкость, ударопрочность	Защитные очки, линзы, прозрачные панели, детали для электроники, медицинские изделия, автомобильные фары
ПММА / PMMA	$(C_5O_2H_8)_n$	Прозрачность, устойчивость к УФ-излучению, хрупкость, легкость в обработке	Линзы, световые панели, рекламные вывески, аквариумы, остекление, декоративные изделия

В представленных химических обозначениях полимеров (таблица 1) формулы приведены в обобщенном виде, где переменная "n" количественно характеризует степень полимеризации, а именно – число повторяющихся мономерных звеньев в макромолекуле.

Структурная формула полиамидов (ПА) не является универсальной и определяется конкретной химической структурой данного типа полимера, что иллюстрируется различиями между распространенными представителями этого класса, такими как РА6, РА66 или кевлар.

Особенность формулы ABS обусловлена его природой как статистического сополимера, что обуславливает необходимость отражения в его записи всех трех типов мономерных единиц, входящих в состав полимерной цепи.

### Выводы

1. Описаны структурные особенности полимеров, включая их химический состав, типы макромолекул и методы синтеза.
2. Установлены различия между кристаллическими и аморфными полимерами, их влияние на термомеханические свойства и поведение при сварке.
3. Приведены характеристики основных видов пластмасс (ПЭ, ПП, ПВХ, ПА и др.) с указанием их свойств и областей применения.

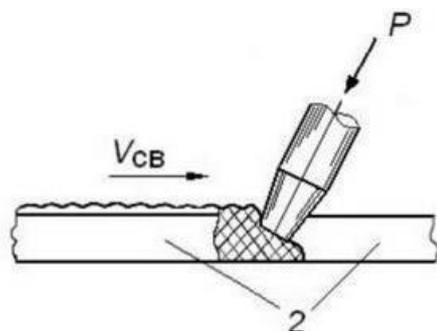
## 2 Виды и методы сварки пластмасс

Сварка пластмасс представляет собой технологический процесс получения неразъемного соединения элементов конструкции посредством диффузионно-реологического или химического взаимодействия макромолекул полимеров, в результате которого между соединяемыми поверхностями исчезает граница раздела и образуется структурный переход от одного полимера к другому [32]. В таблице 2 представлена подробная информация о существующих методах сварки пластмасс. Основные виды сварных соединений представлены на рисунке 7. В основном сварка пластмасс подразделяется на 3 основные группы:

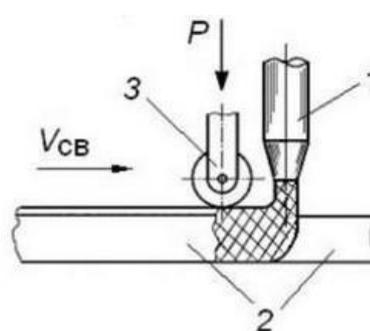
### 1) Тепловые методы (рисунок 4):

- оплавление соединяемых поверхностей струей горячего газа с последующим сжатием;
- сварка нагретым инструментом, контактный метод, при котором поверхности разогреваются металлическим инструментом до вязкотекучего состояния, после чего соединяются под давлением;
- сварка расплавом присадочного материала, нанесенного на подготовленные кромки.

Сварка нагретым инструментом



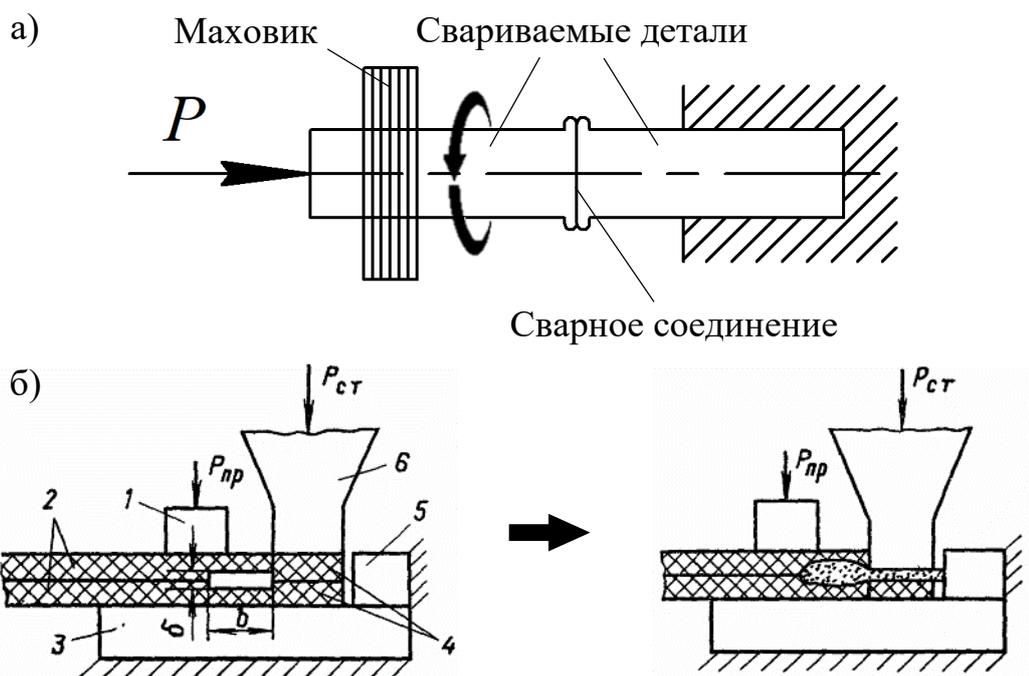
Сварка присадочным материалом



1 – мундштук экструдера; 2 – свариваемые детали; 3 – прикатывающий ролик;  $V_{св}$  – направление сварки;  $P$  – направление приложения нагрузки.

Рисунок 4 – Тепловые методы сварки пластмасс [7]

- 2) Механические методы (рисунок 5):
- Сварка трением, тепло генерируется за счет механического трения соединяемых деталей;
  - ультразвуковая сварка основана на преобразовании механических колебаний ультразвуковой частоты (20...50 кГц) в тепловую энергию на границе контакта.

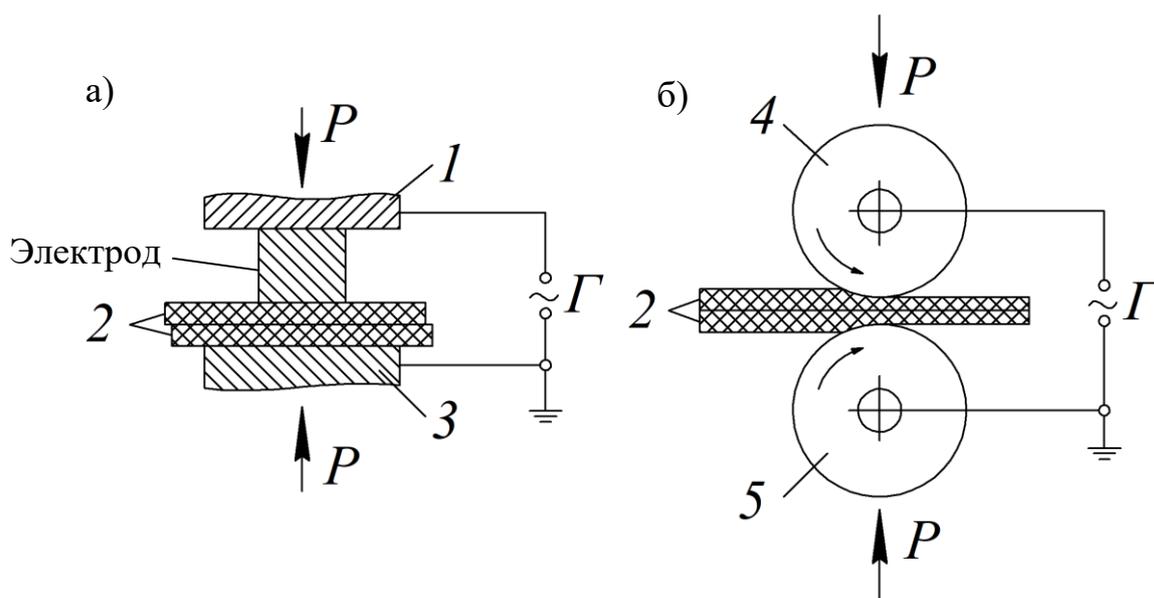


1 – прижим; 2 – свариваемые детали; 3 – опора; 4 – технологические концы для УЗС; 5 – упор; 6 – волновод;  $P$ ,  $P_{ст}$  – давление прижима;  $P_{пр}$  – статическое сварочное давление.

Рисунок 5 – Механические методы сварки пластмасс  
а) – трением; б) – ультразвуком [7]

- 3) Физико-химические:
- Высокочастотная сварка (рисунок 6), нагрев осуществляется за счет диэлектрических потерь в материале под действием электромагнитного поля высокой частоты (10–100 МГц);

- сварка излучением включает лазерную и инфракрасную сварку, нагрев происходит за счет поглощения направленного излучения;
- сварка растворителями, поверхности материалов временно размягчаются растворителем или их смесью, после чего соединяются под давлением;
- химическая сварка основана на введении в зону соединения химических агентов, инициирующих межмолекулярные связи.



1 – высокопотенциальная обкладка конденсатора; 2 – свариваемые образцы; 3 – заземленная обкладка конденсатора; Г – генератор; 4 – высокопотенциальный ролик; 5 – низкопотенциальный ролик.

Рисунок 6 – Высокочастотная сварка, а) – прессовая, б) – роликовая [7]

Существует большое количество видов неразъемных соединений, однако сварка занимает особое место благодаря ряду преимуществ. Ключевым из них является возможность соединения однородных материалов без внедрения инородных элементов, что сохраняет структурную целостность изделия. Это особенно важно в случаях, когда использование крепежных элементов или клеев нецелесообразно из-за увеличения веса конструкции или снижения её химической стойкости. Кроме того, сварка позволяет создавать конструкции минимального веса, что критически важно в авиационной,

автомобильной и строительной отраслях. Высокая производительность, возможность механизации и автоматизации процессов делают её предпочтительной для массового производства, обеспечивая масштабируемость и сокращение трудозатрат. Выбор конкретного способа сварки зависит от множества факторов, среди которых доминируют свойства материалов.

Таблица 2 – Особенности сварки пластмасс [7]

Вид сварки	Достоинства	Недостатки
Нагретым газом	Локальный нагрев крупногабаритных конструкций. Подходит для термопластов (ПЭ, ПП, ПВХ).	Зависит от теплопроводности материала. Требуется навыков для контроля температуры.
Нагретым инструментом	Высокая скорость и стабильность. Эффективен для труб и листов (ПВХ, ПЭ).	Ограниченная форма соединения. Риск перегрева материала.
Расплавом	Подходит для материалов с низкой температурой деструкции (полиолефины). Простота применения.	Низкая прочность шва. Неэффективна для толстостенных изделий.
Трением	Высокая скорость процесса. Эффективна для термопластов с высокой температурой плавления (полиамиды, АБС).	Ограничена геометрией изделий (цилиндрические формы). Риск деформации.
Ультразвуковая	Высокая скорость и точность. Подходит для тонкостенных аморфных термопластов (ПС, ПММА).	Ограничена толщиной материала (до 5 мм). Требуется точной настройки оборудования.
Высокочастотная	Быстрый нагрев полярных полимеров (ПВХ, полиуретаны). Высокая производительность.	Неприменима для неполярных пластмасс (ПЭ, ПП). Высокие энергозатраты.
Излучением	Бесконтактный метод. Точные соединения для микроэлектроники (поликарбонат, ПЭТ).	Высокая стоимость оборудования. Зависит от оптических свойств материала.
Растворителями	Простота реализации. Подходит для аморфных термопластов (ПММА, ПС).	Длительное время испарения растворителя. Токсичность паров.
Химическая	Эффективна для реактопластов (эпоксидные смолы, стеклопластики).	Требуется сложного оборудования и контроля режимов отверждения. Ограниченная область применения.

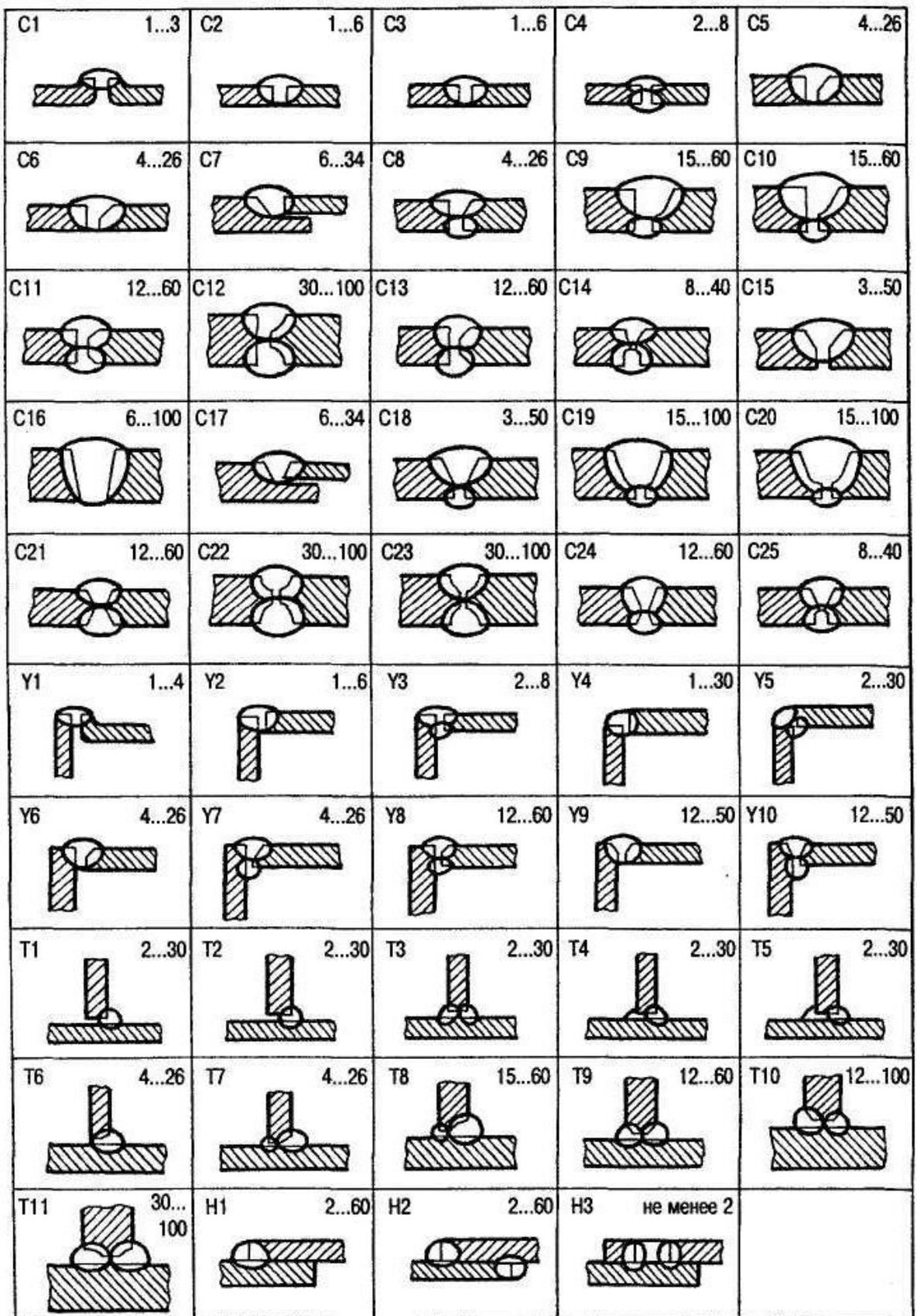


Рисунок 7 – Виды соединения свариваемых деталей: C1...C25 – стыковые; Y1...Y10 – угловые; T1...T11 – тавровые; H1...H3 – нахлесточные.

Наряду с материалами значительную роль играют конструктивные особенности изделий. Геометрические параметры, такие как толщина, длина и ширина шва, а также возможность доступа к соединению с двух сторон, напрямую влияют на выбор технологии.

Рекомендации по выбору метода часто связаны с конкретными условиями применения. Так, сварка нагретым инструментом рекомендуется для толстостенных изделий, таких как трубы, поскольку обеспечивает локализованный нагрев и снижает энергозатраты. Для крупногабаритных конструкций, где требуется гибкость в подводе тепла, подходят методы нагретым газом или расплавом. Если тепловая сварка вызывает коробление или деструкцию материала, как в случае с листами из полиметилметакрилата, применяют сварку растворителями. Химическая сварка, хотя и требует сложного оборудования, остается единственным вариантом для стеклопластиков, где необходимо сохранить остаточную пластичность полимера в зоне соединения.

Эксплуатационные требования, такие как тип нагрузок (отрывающие, сдвигающие, отслаивающие), также влияют на выбор технологии. Например, ультразвуковая сварка обеспечивает высокую прочность при сдвиге, но уязвима к отслаивающим нагрузкам. В случаях комбинированного воздействия, как в цилиндрических деталях, испытывающих кручение, оптимальным решением становится сварка трением.

Выбор способа сварки – это многофакторная задача, требующая учета свойств материала, конструктивных ограничений, технологических возможностей и эксплуатационных условий [7]. Грамотный подход обеспечивает не только прочность и долговечность соединения, но и экономическую эффективность, сокращая время производства и минимизируя риски дефектов.

## Выводы

1. Классифицированы основные методы сварки пластмасс, выделившие три фундаментальные группы: тепловые, и физико-химические, с детализацией их принципов действия и технологических особенностей.
2. Определены ключевые преимущества и характерные недостатки каждого метода сварки, включая специфические ограничения, связанные с геометрией изделий, типом эксплуатационных нагрузок и свойствами материалов.
3. Сформулированы комплексные критерии выбора оптимального метода сварки, требующие обязательного учета совокупности факторов: эксплуатационных, конструктивных параметров соединений и изделий, свойств свариваемых полимерных, а также технологических возможностей и экономической целесообразности.

### 3 Основы ультразвуковой сварки полимеров

Ультразвуковая сварка (УЗС) представляет собой технологию соединения полимеров, основанную на генерации высокочастотных механических колебаний в диапазоне 20...40 кГц. Процесс реализуется за счет

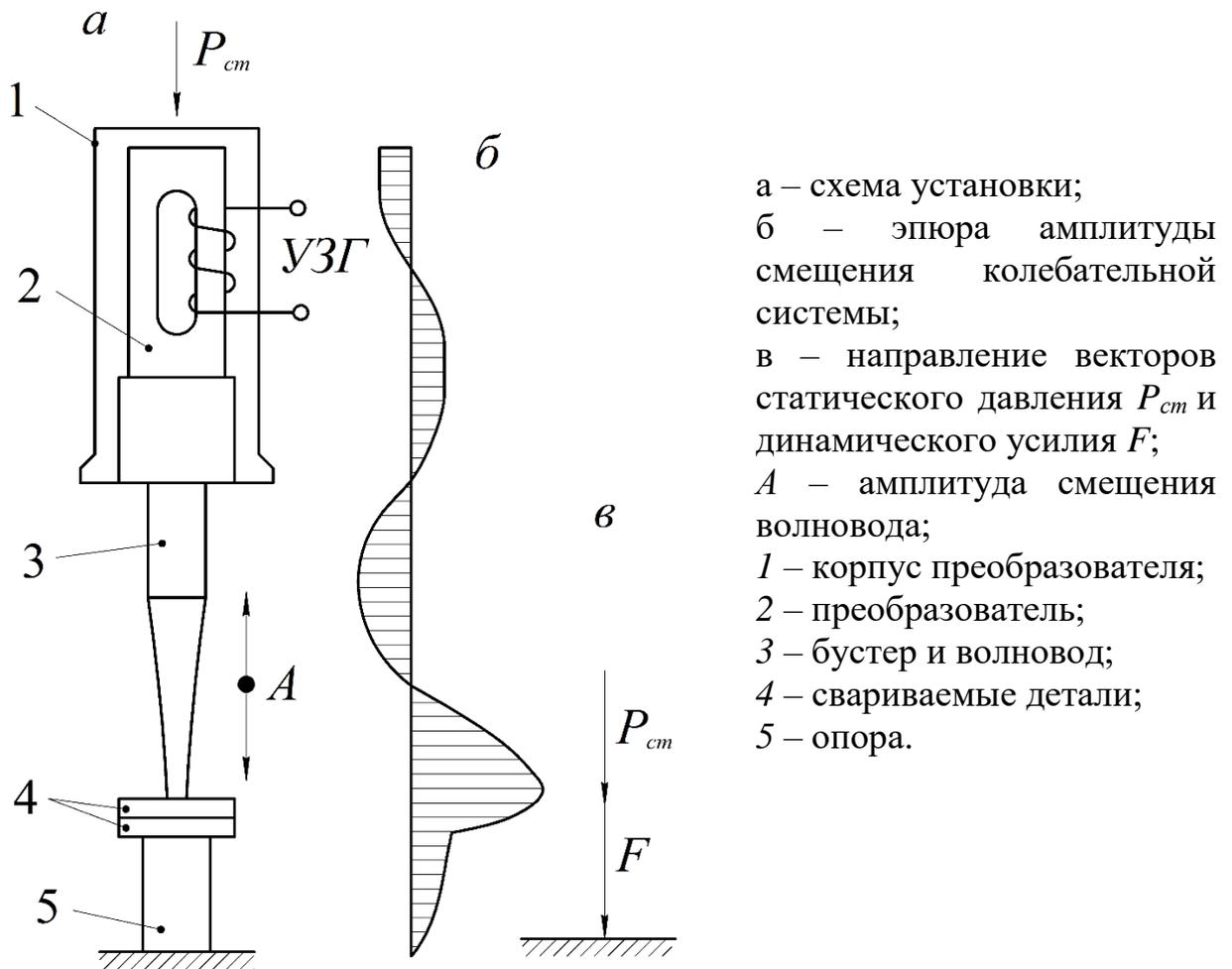


Рисунок 8 – Схема ультразвуковой сварки с нормальным вводом колебаний [7]

преобразования механической энергии в тепловую посредством межмолекулярного трения в зоне контакта соединяемых поверхностей. Механические колебания, генерируемые магнитострикционным преобразователем, передаются через волновод к сварочному инструменту, что вызывает локальный нагрев материала вследствие диссипации энергии

ультразвуковых волн. Данный нагрев сопровождается пластификацией термопласта в области стыка с последующей рекомбинацией макромолекул при охлаждении под механическим давлением. На рисунке 8 представлена схема УЗС.

Технологический алгоритм УЗС включает следующие этапы:

- 1 Фиксация термопластичных деталей и соединение под заданным статическим давлением.
- 2 Возбуждение ультразвуковых колебаний магнитострикционным преобразователем и их передача через волновод к зоне контакта.
- 3 Пластификация материала на границе раздела за счет вибрационно-теплового воздействия.
- 4 Формирование монолитного соединения в результате кристаллизации расплава после прекращения колебаний.

Основными параметрами определяющие эффективность ультразвуковой сварки (УЗС) являются:

- Амплитуда колебаний торца инструмента определяет интенсивность механического воздействия на материал. Превышение оптимального значения амплитуды приводит к экструзии расплава из зоны соединения и термической деструкции полимера, что снижает прочность шва.
- Статическое давление, прикладываемое к соединяемым деталям, оказывает влияние на формирование контакта между поверхностями. Зависимость прочности соединения от давления имеет экстремальный характер, так как при недостаточном давлении возникает неполный контакт, а при избыточном – ускоренное охлаждение расплава, препятствующее рекристаллизации материала.
- Время сварки устанавливается эмпирически, исходя из термофизических свойств полимера (теплопроводности, температуры плавления) и геометрических параметров изделия (толщины, площади контакта). Оптимальное время обеспечивает полное проплавление поверхностного слоя без перегрева объемных зон.

– Частота колебаний отвечает за генерацию тепла в зоне контакта, глубину проникновения энергии и скорость сварки. Повышение частоты колебаний сокращает время сварки и уменьшает глубину проникновения энергии.

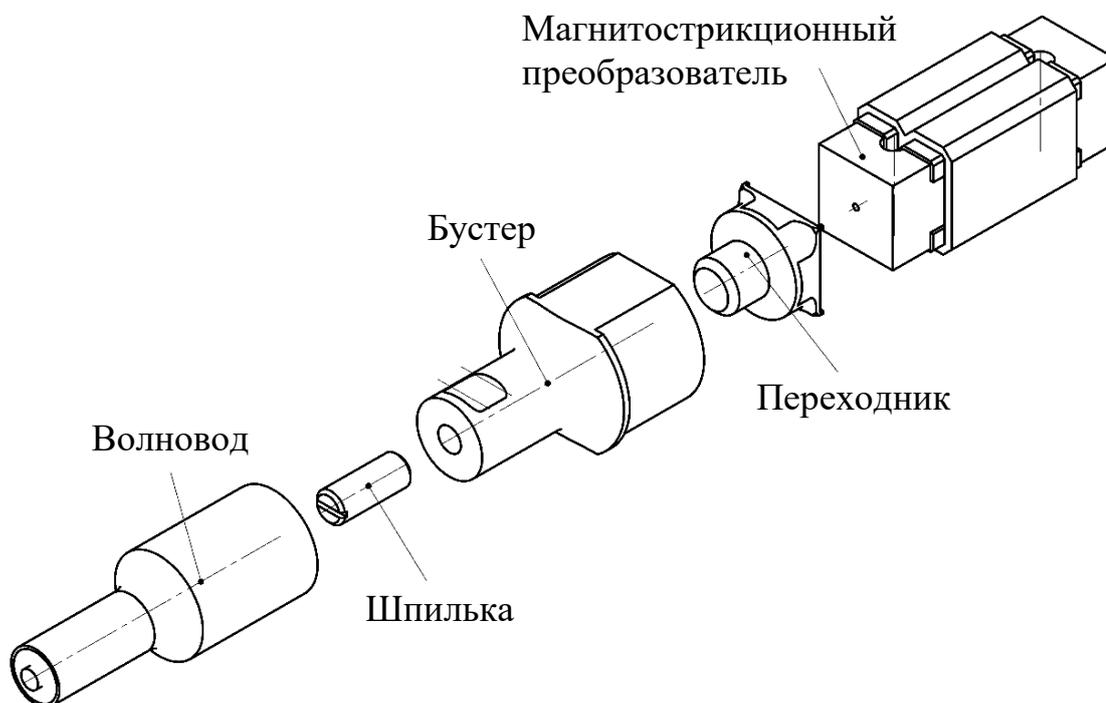


Рисунок 9 – Схема ультразвуковой колебательной системы [28]

Конструкция инструмента для ультразвуковой сварки (рисунок 9) включает в себя три основных элемента: магнестрикционный преобразователь, который выполняет функцию генератора механических колебаний, преобразуя электрическую энергию в высокочастотные вибрации; волновода, выполненного из материала с низким коэффициентом затухания (например, титанового сплава ВТЗ–1), передающего колебания от преобразователя к сварочному инструменту, фокусируя энергию в зоне контакта и амплитудного трансформатора (бустера), который позволяет увеличивать амплитуду продольных колебаний инструмента и согласовывать ультразвуковой сигнал, тем самым сводя резонансный импеданс к минимуму

[28]. Оснастка для фиксации образцов носит побочный характер при ультразвуковой сварке, она обеспечивает равномерное распределение статического давления по поверхности соединения, минимизируя деформации и смещения деталей в процессе сварки. Её конструкция варьируется в зависимости от геометрии изделия и требований к точности позиционирования.

УЗС – технологический метод соединения материалов, обладающий экологической безопасностью и исключающий необходимость применения химических реагентов, что обусловлено отсутствием выделения токсичных газов в процессе обработки. Метод основан на локализованном энергетическом воздействии ультразвуковых колебаний, приводящем к микропластификации поверхностных слоев материала, что минимизирует риск термической деградации полимеров за счет исключения избыточного теплового воздействия. Ключевыми характеристиками технологии являются высокая скорость процесса (от долей до нескольких секунд) благодаря быстрому разогреву зоны соединения, а также стабильность и воспроизводимость результатов, подтвержденная механическими испытаниями на сдвиг и растяжение, демонстрирующими, что прочность сварного шва достигает 80–90% от прочности основного материала. Локальное выделение теплоты в зоне контакта предотвращает перегрев окружающих участков, характерный для других методов сварки, что обеспечивает сохранение структурной целостности изделия. Технология универсальна: позволяет формировать соединения деталей со сложной геометрией, включая труднодоступные зоны, а также материалов с повышенной жесткостью, при этом дистанционная УЗС обеспечивает сварку на значительном удалении от точки ввода энергии. Важным преимуществом является возможность выполнения соединений по загрязненным поверхностям, что расширяет промышленные применения метода. Автоматизация процесса и интеграция аппаратного оснащения в технологические линии обеспечивают высокую рентабельность в условиях

крупносерийного и массового производства, а отсутствие визуально идентифицируемого шва сохраняет эстетические и функциональные свойства изделий, что критично для микроэлектроники и медицинского приборостроения, где минимизация остаточных напряжений и механических деформаций выступает ключевым требованием.

Образование сварного соединения в процессе ультразвуковой сварки полимерных материалов представляет собой сложный термомеханический процесс, основанный на топохимических реакциях, протекающих на границе раздела соединяемых поверхностей. Данный процесс включает три взаимосвязанные стадии, каждая из которых характеризуется специфическими физико-химическими условиями.

1) Образование физического контакта – обусловлено созданием плотного контакта между свариваемыми поверхностями под действием статических и динамических нагрузок. Механизм уплотнения материала зависит от его физического состояния и реологических свойств. Вибрационное воздействие, генерируемое ультразвуковыми колебаниями, способствует микродеформациям поверхности, устраняя макроскопические неровности и оксидные слои [6, 7].

2) Активация контактных поверхностей – реализуется за счет преобразования механической энергии ультразвуковых колебаний в тепловую энергию, что приводит к локальному разогреву материала. Термическая активация сопровождается диссипацией энергии на молекулярном уровне, вызывая разрыв слабых межмолекулярных связей и переход полимера в вязкотекучее состояние. Параллельно могут возникать структурные изменения, такие как ориентация макромолекул, деструкция полимерных цепей или рекомбинация радикалов, индуцированных ультразвуком [6, 7].

3) Объемное развитие взаимодействия – происходит взаимная диффузия расплавленных полимерных цепей в зоне контакта, сопровождающаяся реологическим течением материала. Динамическое

давление, создаваемое волноводом, интенсифицирует перемешивание расплава, обеспечивая формирование гомогенной структуры [6, 7].

Вопрос контроля качества остается актуальным, так как прочность сварного шва может уступать прочности исходного материала из-за неполной рекристаллизации или наличия дефектов.

## Выводы

1. Описаны принципы ультразвуковой сварки, включая преобразование механических колебаний в тепловую энергию и рекомбинацию макромолекул.

2. Выделены ключевые параметры процесса: амплитуда колебаний, статическое давление, время сварки и их влияние на качество соединения.

3. Обоснованы преимущества ультразвуковой сварки, такие как высокая скорость, экологичность и сохранение структурной целостности изделий.

#### 4 Методы оценки качества сварных соединений полимеров

Оценка качества сварных соединений полимерных материалов базируется на применении методов, которые условно можно разделить на две группы: неразрушающий контроль (НК) и разрушающий контроль (РК). Каждая группа объединяет специфические методики, направленные на выявление дефектов, анализ структурных особенностей и определение эксплуатационных характеристик. Интеграция этих подходов, как подчеркивается в работах [6, 23] Кульневича и Волкова, обеспечивает полноту диагностики и минимизацию погрешностей.

##### Неразрушающий контроль (НК)

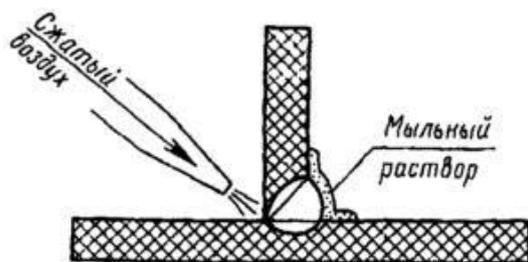
Методы НК (рисунок 10) позволяют исследовать соединение без нарушения его целостности, что делает их незаменимыми для серийного производства.

1) Визуальный и оптический контроль является первичным этапом, включающий макроскопический осмотр сварного шва для выявления поверхностных дефектов: трещин, коробления, неравномерности краев. Использование оптических приборов (лупы, микроскопы) повышает точность обнаружения микродефектов, таких как «нити» пластмассы или локальные расслоения. Однако метод неэффективен для диагностики внутренних дефектов, например, «непровара», что требует применения дополнительных методик.

2) Контроль герметичности применяется для изделий, работающих под давлением или в контакте с жидкостями. Метод основан на подаче газа (пневматический контроль) или жидкости (гидравлический контроль) под давлением в зону шва. Образование пузырьков или утечка фиксируют микротрещины и поры. Химические индикаторы, меняющие цвет при контакте с рабочей средой, также используются для визуализации дефектов.

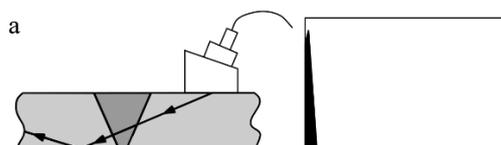
3) Ультразвуковая дефектоскопия как отмечает С.С. Волков, ультразвуковые волны, генерируемые пьезоэлектрическими

преобразователями, взаимодействуют с внутренней структурой материала. Отражение сигналов от границ дефектов (пор, включений) позволяет построить акустическую карту шва. Для полимеров характерны высокое затухание и низкая скорость распространения волн, что требует использования низкочастотных датчиков (20–50 кГц). Метод эффективен для обнаружения расслоений и зон «непровара».



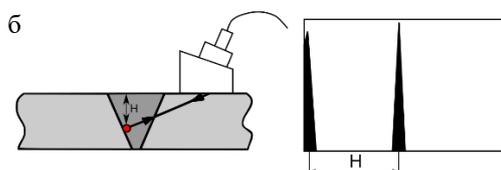
#### Контроль герметичности (пневматический контроль)

Сварной шов продувается сжатым воздухом и если в шве есть сквозные дефекты, их можно обнаружить по вспениванию мыльного раствора.

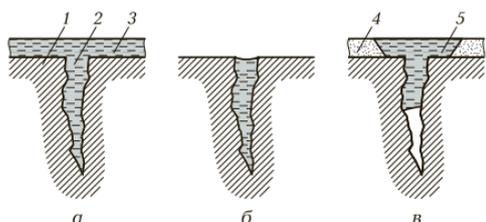


#### Ультразвуковая дефектоскопия (эхо-импульсный метод)

а – УЗК (без дефекта); б – УЗК (с дефектом)



Метод основан на отражении сигналов по объему исследуемого образца, если в детали присутствуют дефекты, дефектоскоп покажет дополнительные пики.



#### Капиллярная дефектоскопия

а – полость заполняется пенетрантом; б – жидкость удаляется с поверхности; в – наносится проявитель, трещина выявляется; 1 – деталь; 2 – трещина; 3 – пенетрант; 4 – проявитель; 5 – индикаторный след трещины.

Рисунок 10 – Схемы некоторых методов НК

4) Рентгенография обеспечивает просвечивание шва рентгеновскими лучами, выявляет объемные дефекты (поры, полости) за счет различий в поглощении излучения. Низкая контрастность полимеров компенсируется использованием цифровых детекторов с высокой чувствительностью. Метод применяется реже из-за дороговизны и необходимости радиационной защиты.

5) Капиллярная дефектоскопия основана на проникновении индикаторной жидкости (пенетранта) в поверхностные трещины. Затем наносится проявитель, который визуализирует дефекты за счет капиллярного эффекта. Метод ограничен выявлением только поверхностных дефектов и требует тщательной подготовки образца.

б) Анализ внутренних напряжений осуществляется погружением образца в этиловый спирт, который вызывает растрескивание в зонах с остаточными напряжениями. Метод качественный и требует подтверждения количественными тестами.

#### Разрушающий контроль (РК)

Методы РК предполагают механическое разрушение образца для получения прямых данных о прочности и структурной целостности.

##### 1) Механические испытания:

– Испытания на растяжение, определяет предел прочности и модуль упругости шва. Позволяет выявить «непровар» по характерному снижению прочности.

– Испытания на изгиб оценивает пластичность соединения. Трещины в зоне изгиба указывают на неравномерность структуры шва.

– Тесты на отслаивание используются для оценки адгезии в многослойных соединениях.

2) Микроструктурный анализ позволяет проводить исследования срезов шва с помощью оптической или электронной микроскопии, выявляет дефекты сплавления, поры и зоны термической деградации. Например, работа Кульневича демонстрируют связь между скоростью охлаждения полимера и размером кристаллитов в зоне сварки [23].

##### 3) Термический анализ:

– Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК): Определение температур плавления и стеклования, что позволяет оценить степень кристаллизации в шве.

– Термогравиметрический анализ (ТГА): Выявление термической стабильности материала.

В таблице 3 представлена сравнительная характеристика НК и РК

Таблица 3 – Сравнительная характеристика методов оценки [6, 23]

Метод	Тип контроля	Глубина анализа	Основные дефекты	Ограничения
Визуальный осмотр	НК	Поверхность	Трещины, коробление	Не выявляет внутренние дефекты
Ультразвуковой	НК	1–50 мм	Расслоения, включения	Высокое затухание в полимерах
Рентгенография	НК	Полный объем	Поры, полости	Низкая контрастность
Механические испытания	РК	Объемный	Непровар, низкая адгезия	Разрушение образца

Эффективность оценки качества, как показано в исследовании Волкова по ультразвуковой сварке полипропилена, достигается комбинацией НК и РК. Например, предварительный ультразвуковой скрининг позволяет отбраковать 80% дефектных образцов, а последующие механические испытания уточняют критичность оставшихся дефектов. Подобный подход, дополненный микроструктурным анализом, обеспечивает соответствие ГОСТ 11262-2017 для полимерных материалов.

## Выводы

1. Систематизированы методы неразрушающего контроля (визуальный осмотр, ультразвуковая дефектоскопия) и разрушающего контроля (механические испытания, микроструктурный анализ).
2. Установлены ограничения методов НК для выявления внутренних дефектов и необходимость комбинированного подхода с РК.
3. Определен стандарт испытаний (ГОСТ 11262-2017) для оценки прочности сварных соединений.

## 5 Экспериментальная часть

### 5.1 Материал исследования

С началом коммерческого использования координационной полимеризации в 1957 году стало возможным производство полипропилена. За прошедшие десятилетия он стал одним из основных мировых пластиков, а его производство в США на 1982 году составило около 3,6 млрд фунтов, что примерно на 10% меньше рекордных 4,0 млрд фунтов в 1981 году, при цене около 0,40 долларов за фунт.

Полимеризация пропилена, получаемого из газа на олефиновых заводах и нефтеперерабатывающих предприятиях, осуществляется с использованием координационных катализаторов. Этилен, пропилен и другие  $\alpha$ -олефины можно полимеризовать на одном и том же оборудовании с очень небольшими изменениями, что обеспечивает высокую гибкость в работе.

Таблица 4 – Свойства полипропилена [26]

Плотность, г/см <sup>3</sup>	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

Полимеры имеют три варианта расположения (рисунок 11), а именно:

- Изотактическое (а) – все заместительные группы радикалов лежат выше (или ниже) плоскости основной цепи.
- Синдиотактическое (б) – замещающие группы попеременно лежат над и под плоскостью.
- Атактический (в) – случайная последовательность расположения заместителя происходит вдоль цепи.

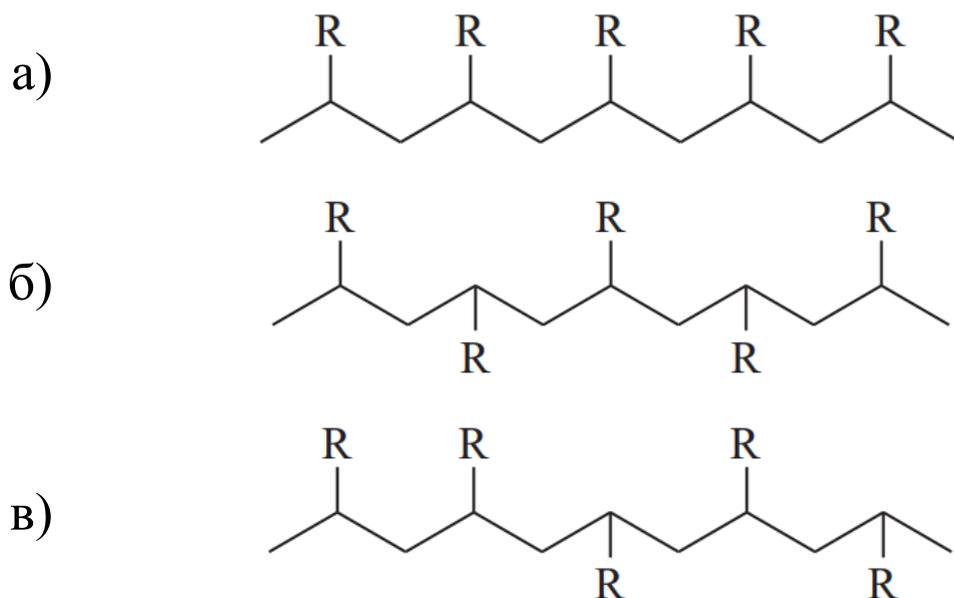


Рисунок 11 – Варианты расположения радикалов в цепи полимера [14]

Изотактический полипропилен единственный вид, представляющий коммерческий интерес [14] благодаря своим свойствам, которые представлены в таблице 4.

Полипропилен - самый легкий из основных пластиков, высокая степень кристалличности придает ему высокую прочность на разрыв, жесткость и твердость. Высокое соотношение прочности и веса является преимуществом во многих областях применения. Готовые изделия обычно имеют хороший блеск и высокую стойкость к истиранию. Высокая температура плавления полипропилена позволяет стерилизовать хорошо отформованные детали, и полимер сохраняет высокую прочность на разрыв при повышенных температурах.

Литьё под давлением остаётся ключевым методом обработки полипропилена, что обусловлено его высокой технологичностью и соответствием требованиям массового производства. Как отмечается в аналитике ПАО «СИБУР Холдинг», внедрение инновационных полимерных решений в автомобилестроении является ключевым драйвером роста отрасли:

к 2030 году доля отечественных полимеров в компонентах автомобилей может достичь 80%, что соответствует стратегии импортозамещения [3].

Термическая сварка сохраняет доминирующее положение в процессах соединения полимерных конструкций (более 75% промышленных применений), что подтверждается её использованием при производстве ответственных узлов, таких как элементы топливных систем и интерьерных панелей. Технологическая эффективность метода соответствует не только требованиям ГОСТ Р 56766-2015, но и стандартам ведущих автоконцернов, включая АВТОВАЗ, где доля полипропиленовых деталей в новых моделях увеличилась на 40% за 2022–2023 гг. [3].

В качестве объекта исследования выбран листовой полипропилен марки «Бален» 01030 (ТУ 2211-074-05766563-2015). Данный материал активно применяется в проектах локализации авто-компонентов. Например, при создании бамперов и элементов подкапотного пространства, где сочетание ударной вязкости и термостойкости обеспечивает снижение массы деталей на 15–20% без потери прочности [3]. Репрезентативность выбора подтверждается необходимостью в разработке композитов для перспективных моделей LADA Vesta NG, где доля композитных материалов на основе полипропилена превышает 12% от общей массы автомобиля.

## **5.2 Выбор метода эксперимента**

На этапе подготовки к экспериментальной части исследования разработка и создание специализированной оснастки (рисунки 12...15) определились как приоритетная задача, направленная на обеспечение воспроизводимого позиционирования образцов, точного дозирования механических нагрузок и контроля температурных параметров в зоне сварного соединения. Процесс включал проектирование 3D-моделей в программе SolidWorks и изготовление физических деталей. Важность данного этапа

обусловлена необходимостью минимизации внешних факторов, способных исказить результаты эксперимента.

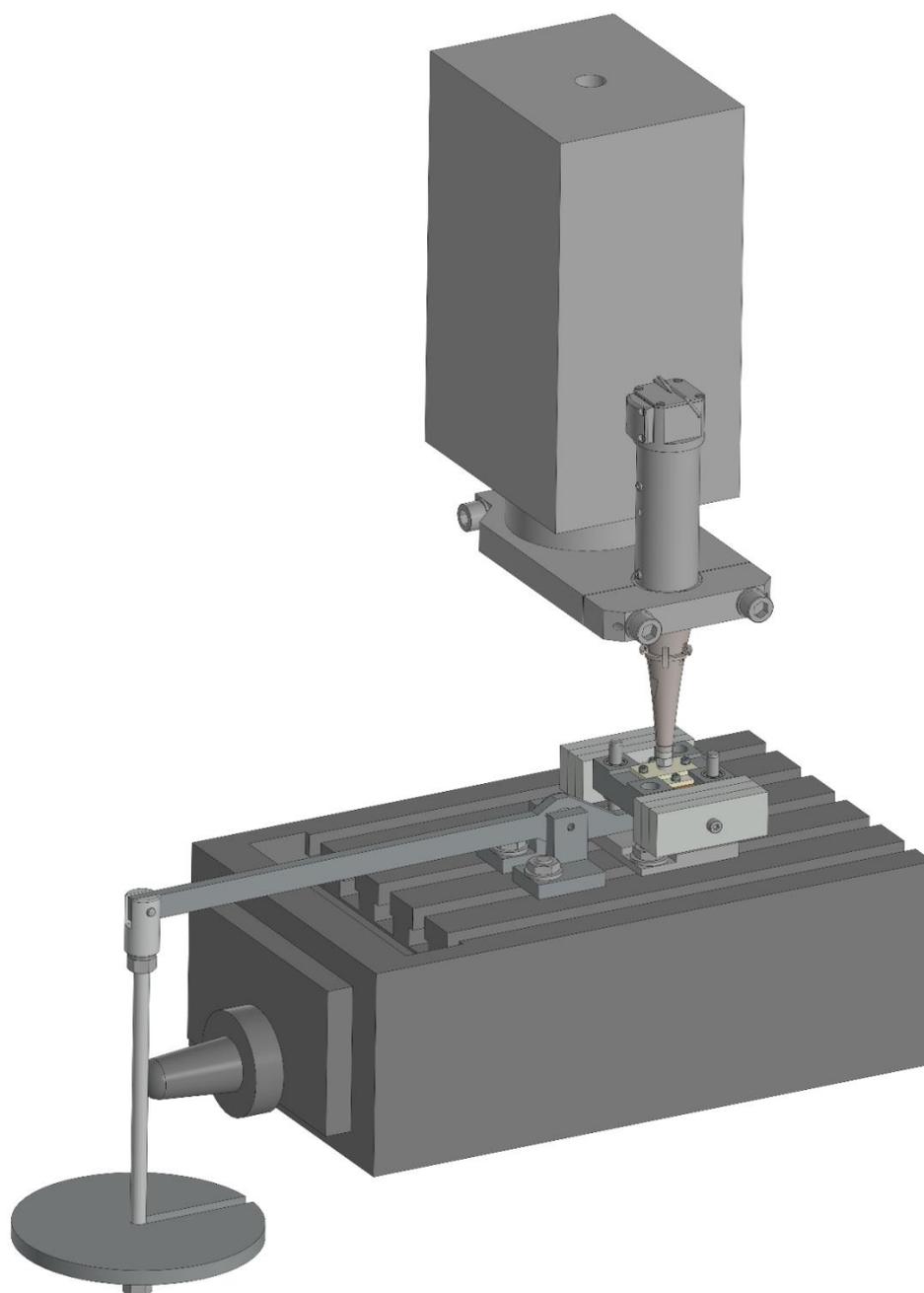


Рисунок 12 – 3D модель экспериментальной оснастки

Конструкция оснастки включает три ключевых компонента, функционально связанных с обеспечением точности и воспроизводимости экспериментальных условий.

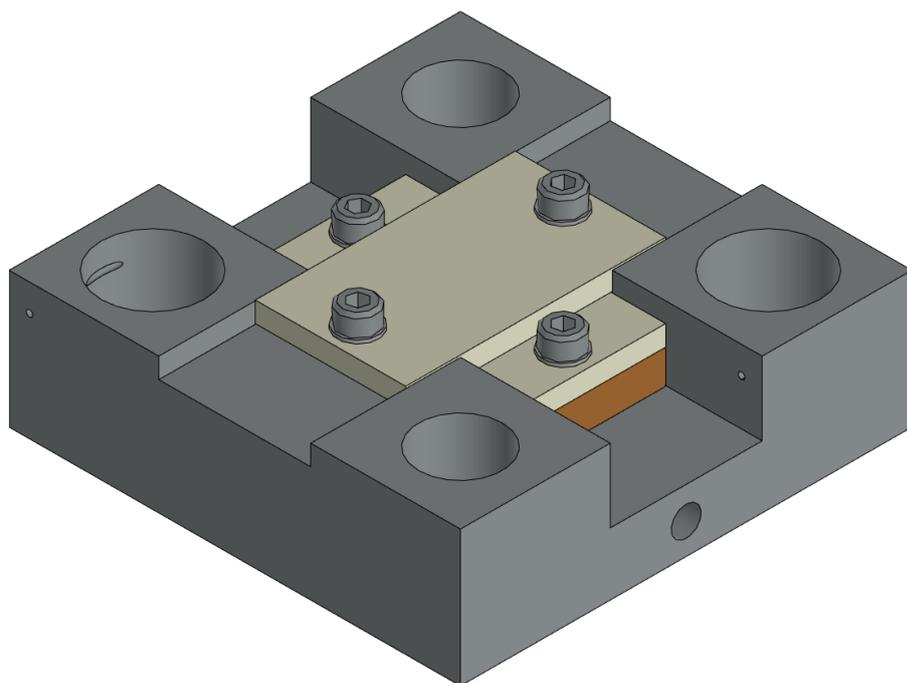


Рисунок 13 – Призма для позиционирования образцов

Первый элемент – призма (рисунок 13), изготовленная из стали 40Х, выполняющая роль базового элемента для фиксации образцов. Геометрия рассчитана так, чтобы минимизировать смещения в процессе испытаний, что достигается за счет плотного контакта с поверхностью образца, равномерного распределения контактных напряжений и винтовой фиксации образцов.

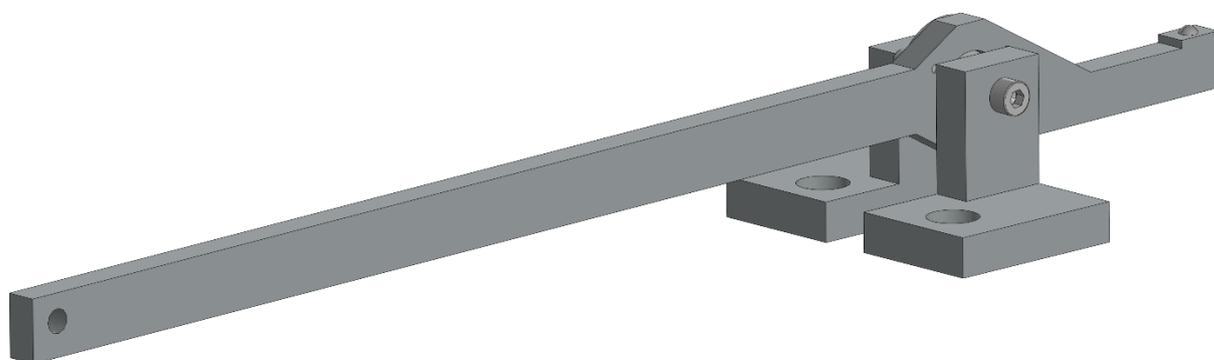


Рисунок 14 – Рычаг в сборе со стойками

Второй элемент – рычажный механизм (рисунок 14) изготовлен из стали 40Х, реализующий принцип силового преобразования на основе закона равновесия моментов сил (метод рычага в рамках прикладной механики). Данный элемент спроектирован с учетом соотношения плеч (1:4), что позволяет усиливать прикладываемую нагрузку в соответствии с требованиями эксперимента.

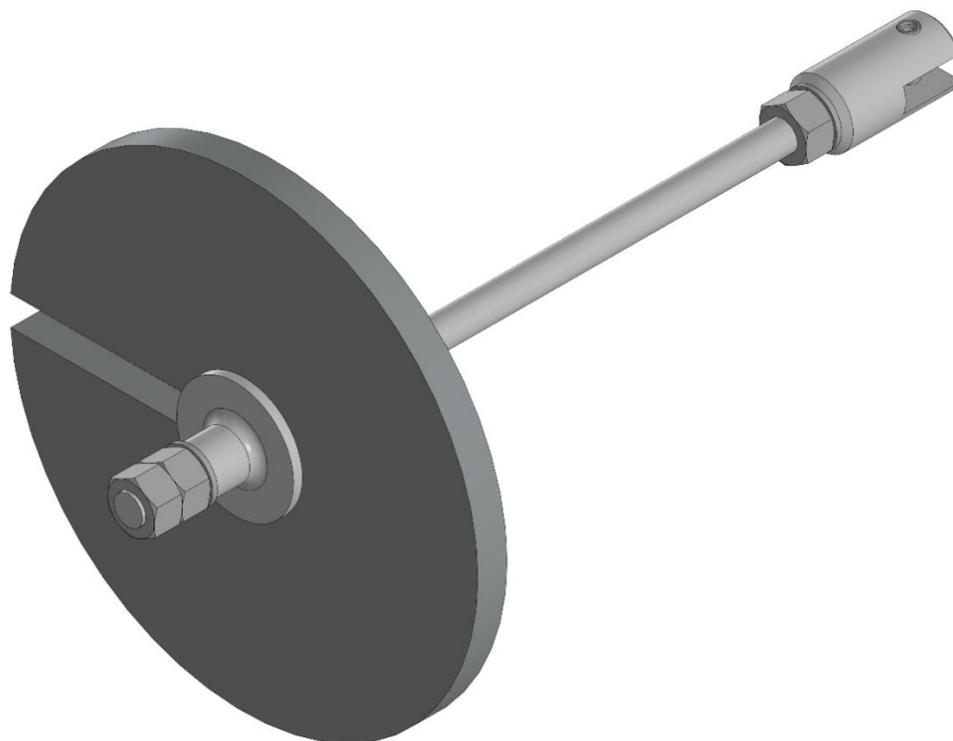


Рисунок 15 – Подвес для гирь в сборе

Третий элемент – подвесная система (рисунок 15), изготовленная из сплава Д16Т, оснащенная калиброванными гирями массой от 0,2 до 2,2 кг, обеспечивающая дискретное изменение нагрузки с шагом 0,2 кг. Принцип действия оснастки базируется на классических положениях сопромата – рычаг трансформирует усилие, создаваемое гирями, в контролируемую нагрузку, приложенную к зоне ультразвуковой сварки образцов, что моделирует условия эксплуатационного нагружения. Конструктивные параметры рычага

(длина плеч, жесткость сечения) оптимизированы для исключения упругой деформации самого механизма при максимальной нагрузке.

После завершения проектирования 3D-моделей последовал этап физической реализации деталей, основанный на технических чертежах и спецификациях. Изготовление компонентов осуществлялось на производственных мощностях АО «АВТОВАЗ» с применением специализированного оборудования. Ниже на рисунке 16 приведена физическая модель оснастки.



Рисунок 16 – Физическая модель экспериментальной оснастки

Основные компоненты – рычаг, призма, крепежные элементы – были изготовлены на универсальном фрезерном станке 67К25, обеспечившем соблюдение геометрических параметров с допуском  $\pm 0,1$  мм. Отверстия стандартной точности (класс Н8) формировались фрезерованием, что позволило достичь шероховатости  $Ra\ 1,25$ . Гири цилиндрической формы, а

также тела вращения (винты, шайбы) изготавливались на токарном станке 16Б16ИП с последующей доводкой на плоскошлифовальном станке 3Е711ВФ2 до номинальных значений, контролируемых электронными весами с погрешностью  $\pm 0,01$  г. Сборка оснастки выполнялась в соответствии с требованиями ГОСТ 25346-2017, регламентирующим посадки и зазоры в подвижных соединениях, сопряжение рычага с осью базировалось на системе отверстие-вал по Н7/г6, что исключило неконтролируемый люфт. Соосность отверстий в призме контролировалась индикаторным нутромером с точностью 0,01 мм, а геометрия рычага цифровым штангенциркулем ТУЛАМАШ ШЦ-І-150-0,01. Все используемое оборудование представлено на рисунках 17...20



Рисунок 17 – Универсальный фрезерный станок 67K25



Рисунок 18 – Токарный станок 16Б16ИП



Рисунок 19 – Плоскошлифовальный станок 3E711BФ2



Рисунок 20 – Цифровой штангенциркуль ТУЛАМАШ ШЦЦ-I-150-0,01

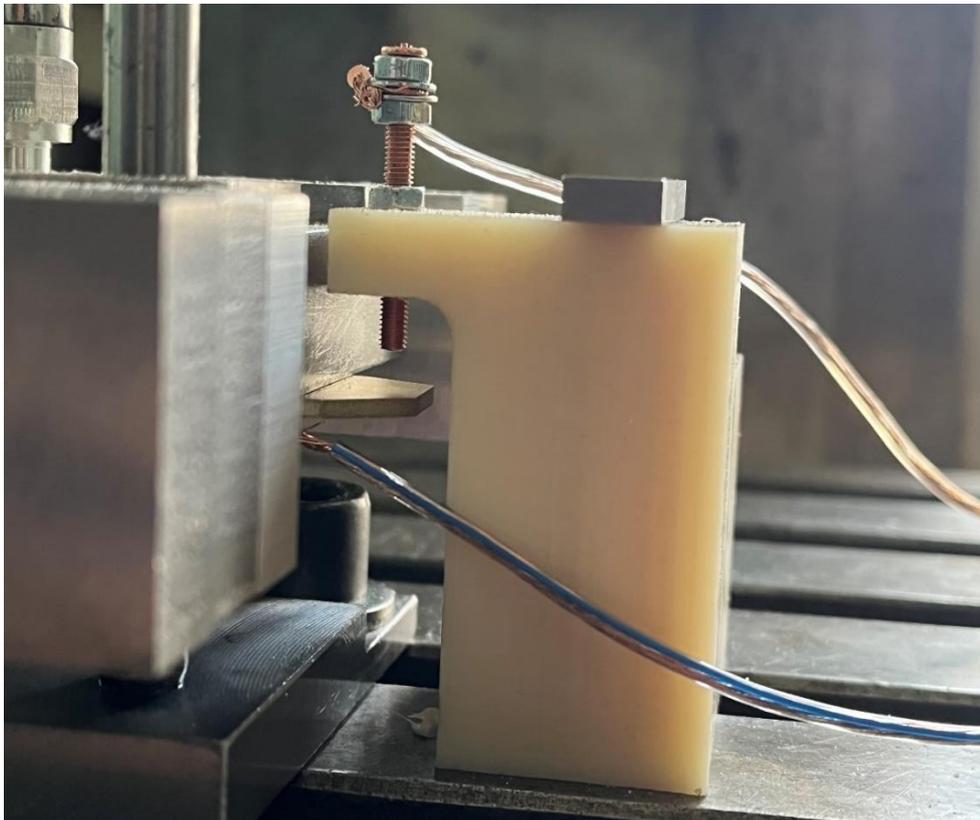


Рисунок 21 – Модуль ограничения глубины проникновения сварного инструмента в материал (4 мм)

В рамках модернизации экспериментальной оснастки был разработан дополнительный модуль – ограничитель глубины сварки (рисунок 21), функционирующий на принципе дискретного прерывания процесса при

достижении заданной глубины проникновения сварочного инструмента в материал. Конструкция модуля включает медную пластину толщиной 2 мм, зафиксированную на нижней базовой поверхности призмы, и регулируемый медный винт М3×0,5. Зазор между пластиной и винтом, соответствующий требуемой глубине сварки 4 мм, устанавливался с использованием концевых мер длины 2-го класса точности по ГОСТ 9038-90. Принцип действия системы основан на замыкании электрической цепи при контакте медного винта с пластиной, активируя реле, которое в свою очередь передает сигнал на ультразвуковую установку и сварка прекращается.

### 5.3 Изготовление и сварка образцов

Изготовление образцов также производилось на универсальном фрезеровальном станке 67К25, обеспечивающем высокую точность обработки за счет регулируемых режимов резания.

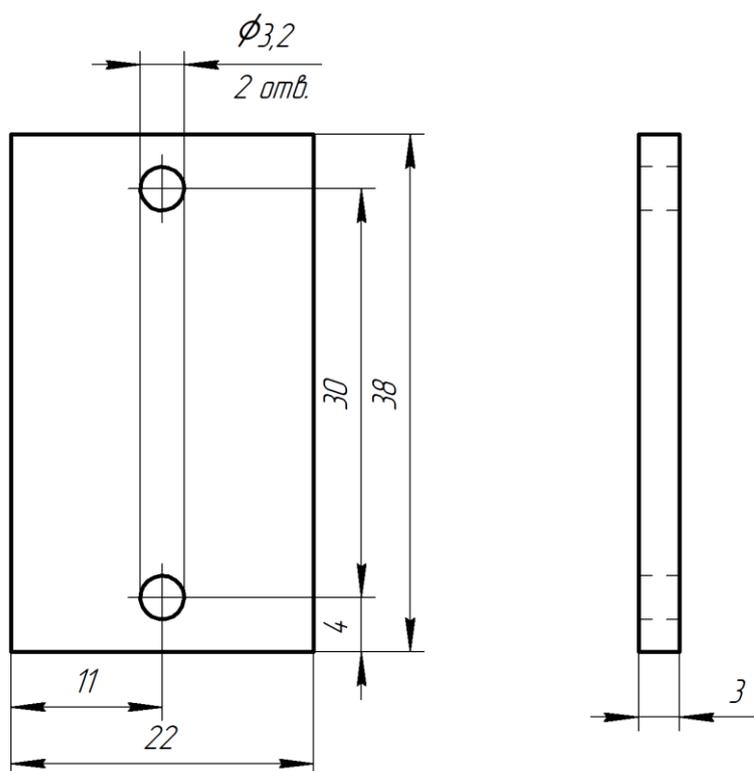


Рисунок 22 – Эскиз образца под вырезку

Параметры обработки (скорость шпинделя, подача, глубина реза) подбирались с учетом физико-механических свойств полипропилена. Технология фрезерования исключала термическую деградацию материала благодаря контролю температурного режима в зоне обработки. Геометрическая идентичность заготовок достигалась за счет использования шаблонов и цифрового управления станком.

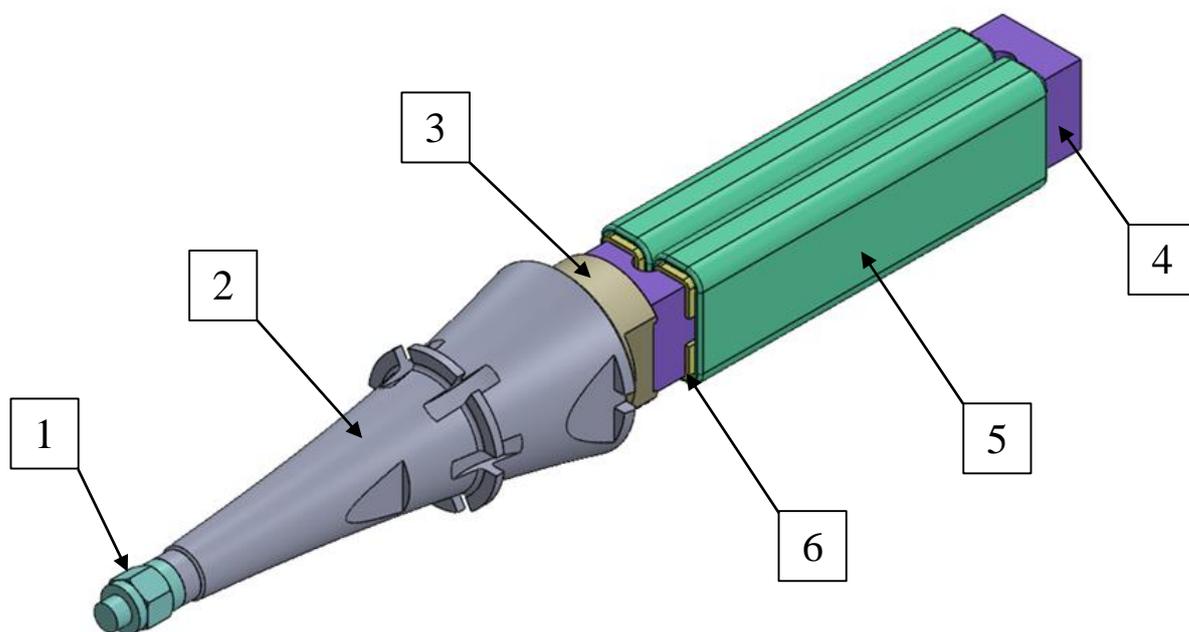
Образцы были изготовлены из полипропилена марки Бален 01030, поставляемого в виде листов с гладкой, не тесненной поверхностью толщиной 3 мм. В общем объеме было изготовлено 220 заготовок, геометрические параметры и готовые образцы представлены на рисунках 22 и 23 соответственно.



Рисунок 23 – Фото изготовленных образцов

Процесс сварки реализовывался посредством ультразвуковой колебательной системы (рисунок 24), функционирующей с генератором ультразвуковых колебаний УЗГ-1/30 (рисунок 25). Ультразвуковой комплекс

разработан на базе Тольяттинского государственного университета. Монтаж технологической оснастки и ультразвуковой системы производился на универсальном фрезеровальном станке, изображение которого приведено на рисунке 16. Конфигурация системы крепления обеспечивала стабильность позиционирования компонентов в процессе воздействия ультразвуковых колебаний.



- 1 – Рабочая часть сварочного инструмента (алюминиевый сплав Д16Т);  
2 – сменный волновод (титановый сплав ВТ3-1); 3 – переходник (сталь 45);  
4 – пакет магнитострикционный (пермендюр К49Ф2); 5 – обмотка возбуждения (медный изолированный провод МГТФ-0,75);  
6 – диэлектрические прокладки (фторопласт-4) [26]

Рисунок 24 – 3D модель УЗКС

Ультразвуковой генератор (рисунок 25) обеспечивает точную настройку частотных характеристик, направленную на достижение резонансных режимов работы системы, что необходимо для синхронизации колебаний с физическими свойствами свариваемых материалов. Параллельно осуществляется модуляция амплитуды механических колебаний,

позволяющая регулировать интенсивность термического воздействия на полимерные структуры. Стабильность процесса сварки достигается за счет поддержания постоянных энергетических параметров колебаний, что минимизирует локальные температурные флуктуации и обеспечивает равномерное распределение тепла в зоне контакта.

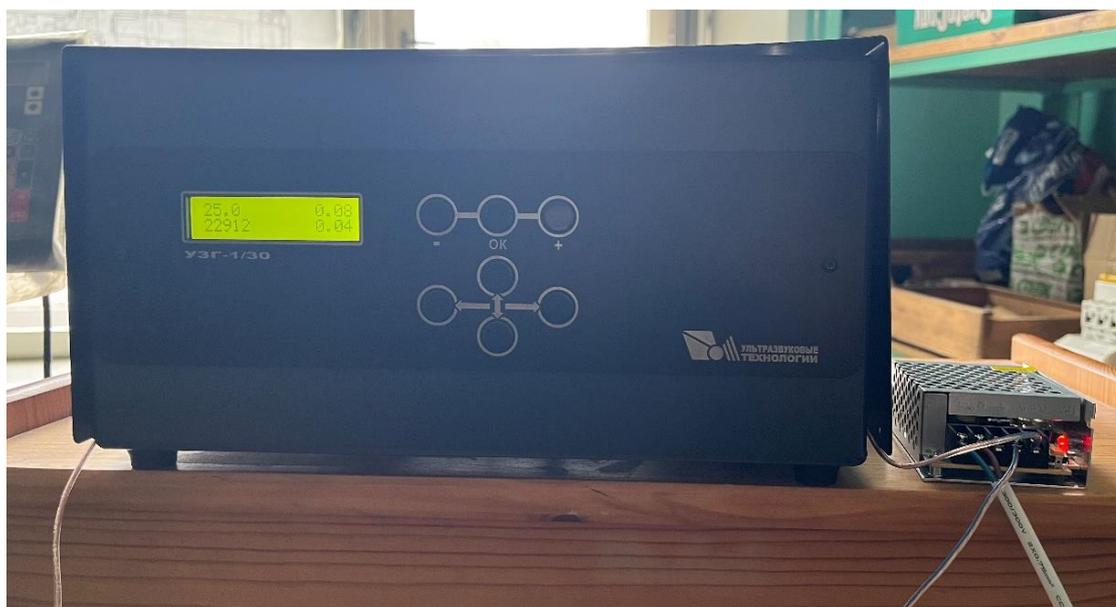
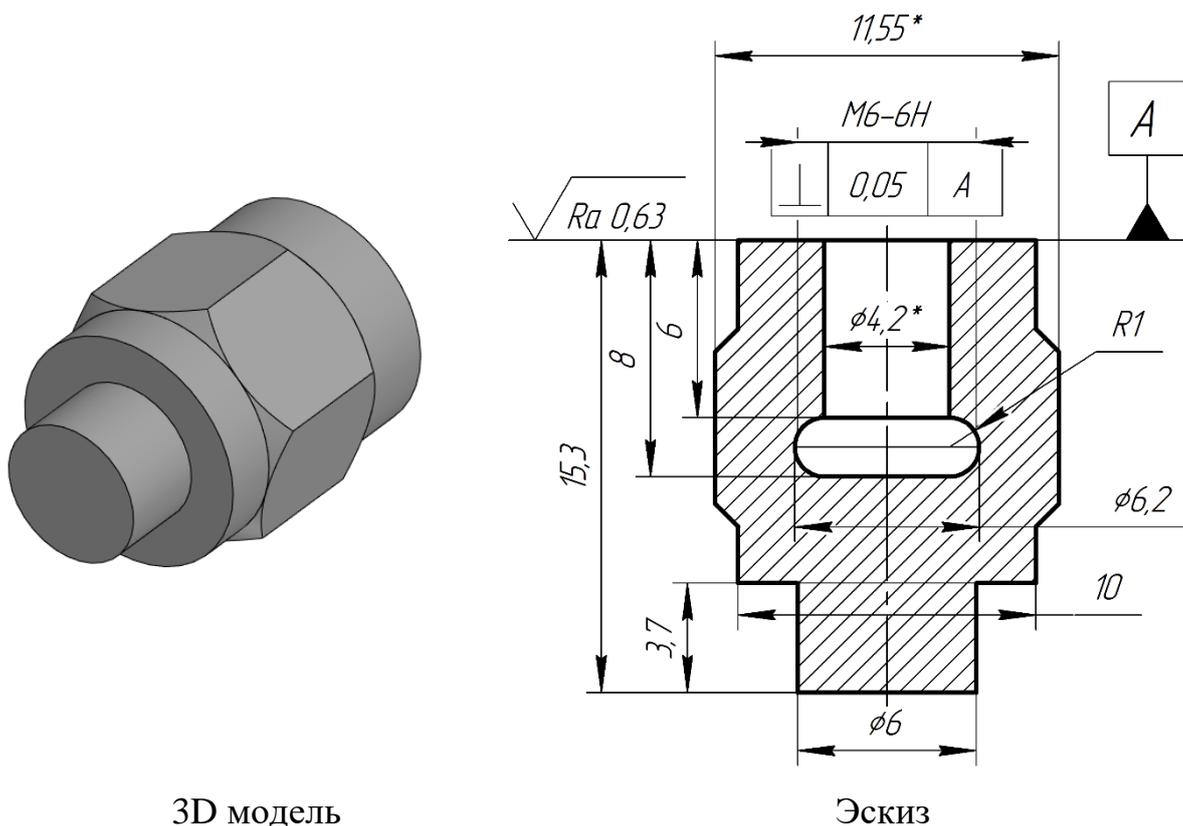


Рисунок 25 – Ультразвуковой генератор УЗГ-1/30

Основываясь на работе [15], В.В. Еник исследовал влияние геометрии рабочего торца инструмента на прочность сварного соединения полипропилена. Экспериментальные данные, полученные в ходе корреляционного анализа, продемонстрировали, что ступенчатая форма РЧСИ с цилиндрической геометрией (насадка № 07) обеспечивает максимальные значения прочности. На рисунке 26 представлен эскиз и 3D модель одноступенчатой рабочей части сварного инструмента (РЧСИ)

Статистическая обработка результатов подтвердила значимую положительную корреляцию ( $R=0,88$ ) между использованием одноступенчатой РЧСИ и прочностью сварных соединений, что обосновывает его выбор в качестве наиболее перспективного варианта [15].



3D модель

Эскиз

\* – Размеры для справок

Рисунок 26 – Одноступенчатая РЧСИ сварного инструмента №07 [15]

Как уже было описано в п. 5.2 приложение нагрузки будет осуществляться по методу рычага в рамках прикладной механики (соотношение  $h_2$  к  $h_1 = 1:4$ ), схема нагружения представлена на рисунке 27.

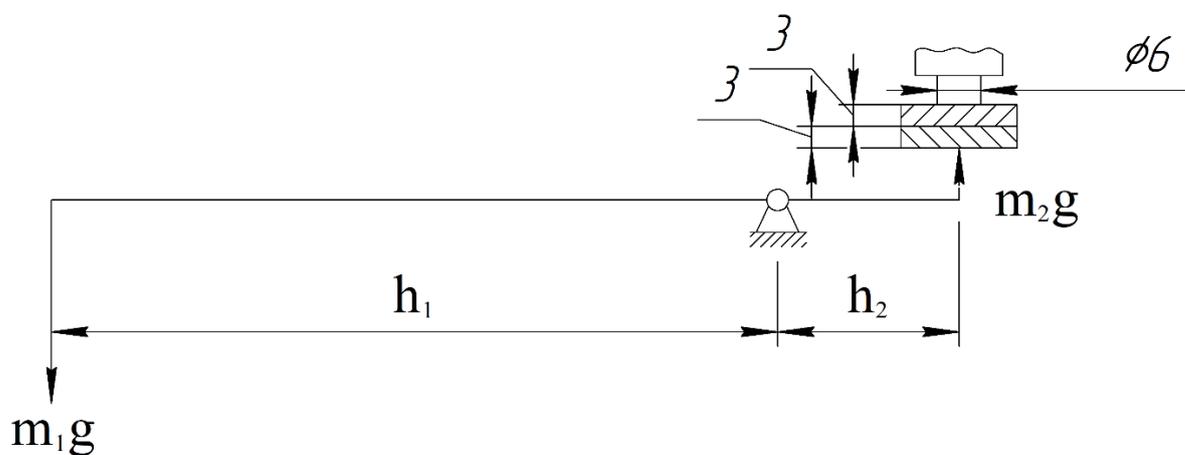


Рисунок 27 – Схема нагружения установки

Согласно справочнику Зайцева [18], критическое давление ( $P_k$ ) под волноводом, при котором сминаются неровности (шероховатость) и нет сдвигов на контактной поверхности образцов и, поэтому, рост температуры на границе раздела происходит с той же скоростью, что и в объеме образца, для полипропилена равно 3 МПа [18, с. 129]. Рассчитаем площадь излучаемой поверхности насадки и выберем необходимую нагрузку.

Рассчитаем площади поверхности торцов меньшего (круг) и большего (кольцо) цилиндра ступени по формуле (1):

$$\begin{aligned} S_d &= \pi \cdot R_d^2 = 3,14 \cdot 3^2 = 28,274 \text{ мм}^2; \\ S_D &= (3,14 \cdot 5^2) - S_d = 50,2765 \text{ мм}^2; \end{aligned} \quad (1)$$

где,  $S_d$ ,  $S_D$  – площади торцовых поверхностей меньшего и большего цилиндра ступени,  $R_d$  – радиус цилиндрического выступа малого цилиндра.

Тогда критическая сила прижима  $F_k$  для полипропилена равна (2):

$$F_k = P_k \cdot S_d = 3 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 28,274 \text{ мм}^2 = 84,823 \text{ Н}; \quad (2)$$

Из уравнения равновесия для крутящих моментов определим критическую массу груза  $m_k$  для создания критической силы прижима  $F_{\Pi} = F_k$  по формуле (3):

$$m_k = \frac{F_{\Pi}}{4 \cdot g} = \frac{84,823 \text{ Н}}{4 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2} = 2,162 \text{ кг}; \quad (3)$$

округлим полученное значение до 2,2 кг, для систематизации экспериментальных данных диапазон нагрузок разделим на 11 равных интервалов с шагом 200 г, где начальное значение соответствует 0,2 кг (первая группа), а конечное – 2,2 кг (одиннадцатая группа). Такое распределение обеспечивает последовательное, возрастающее до критического, воздействие контактной нагрузки в зоне создания и формирования сварного соединения.

Рассчитаем min и max значение силы прижима в области контакта торца меньшего цилиндра со свариваемыми пластинами (4):

$$F_{\Pi \min} = m_{к1} \cdot 4 \cdot g = 0,2 \text{ кг} \cdot 4 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2 = 7,845 \text{ Н}; \quad (4)$$

$$F_{\Pi \max} = m_{к11} \cdot 4 \cdot g = 2,2 \text{ кг} \cdot 4 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2 = 86,299 \text{ Н};$$

получается, что диапазон массы гирь  $m_k = 0,2; 0,4 \dots 2,2$  кг эквивалентен диапазону силы прижима  $F_{\Pi} = 7,845; 15,69 \dots 86,295$  Н.

Убедимся в правильности расчетов и вычислим давление на границе раздела создаваемое меньшим цилиндром для 11-ой группы по формуле (5):

$$P_{11 \text{ 1 ступень}} = \frac{F_{11}}{S_d} = \frac{86,295 \text{ Н}}{28,274 \text{ мм}^2 \cdot 10^{-6}} = 305200 \text{ Па} = 3,052 \text{ МПа}; \quad (5)$$

$$P_{11} > P_k \Rightarrow 3,052 \text{ МПа} > 3 \text{ МПа}.$$

С учетом округления критической массы  $m_k = 2,162$  кг до 2,2 кг – критическое давление в контактной зоне поверхности верхнего образца с торцом 1-ой ступени инструмента должно соответствовать условию  $P_{11} > P_k$ .

Основной вклад в создании и формировании сварного соединения вносит торец ступени РЧСИ, прижимая вытесненный расплав малым цилиндром ступени.

Алгоритм сварки образцов включает:

1) Образцы полипропилена, располагают внахлест, закрепляют поочередно в рабочей зоне сварочной установки при помощи винтов. При этом обеспечивается полная неподвижность и точная ориентация зоны контакта относительно инструмента;

2) Сварочный инструмент (торец) позиционируется в области контакта с образцом с предварительной калибровкой глубины погружения (4

мм). Проверяется параллельность контактной поверхности инструмента плоскости соединения;

3) к зоне сварки прикладывается статическая нагрузка заданной величины от 7,845 до 86,295 Н, обеспечивающая плотный контакт между соединяемыми поверхностями;

4) активируется генератор ультразвуковых колебаний, инструмент совершает возвратно-поступательные движения с заданной частотой и амплитудой. Происходит локальный нагрев материала за счет внутреннего трения и внедрение торца в образцы;

5) по завершении ультразвукового воздействия образцы сохраняются под нагрузкой в течение 60 секунд для стабилизации структуры материала, минимизации остаточных напряжений и охлаждения расплава;

б) снятие статического давления и возврат сварочного инструмента в начальное положение, оборудование переводится в режим паузы для естественного охлаждения рабочих узлов перед началом следующего цикла.

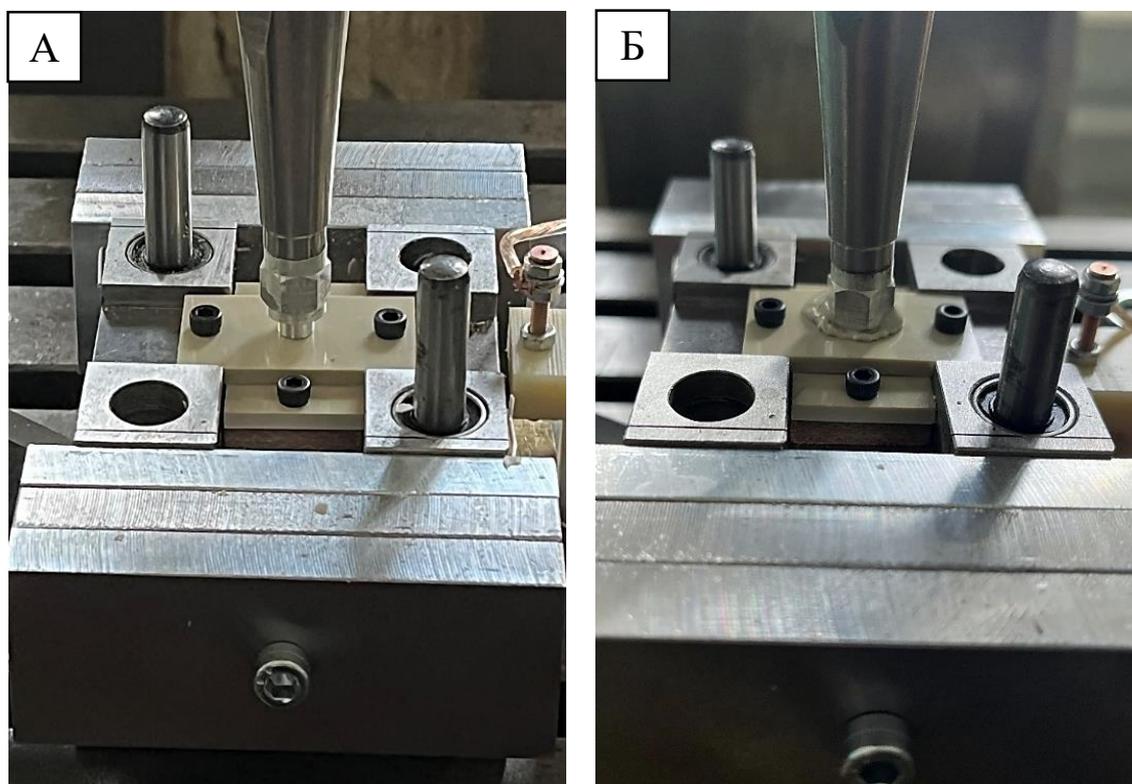


Рисунок 28 – Процесс сварки образцов: а – начало сварки; б – конец сварки

На рисунке 28 приведены фотографии с процессом сварки полипропиленовых образцов.

После подготовки образцов, методики и алгоритма – следующим этапом было проведение эксперимента. Параметры сварки включали: выходную мощность генератора 330 Вт, амплитуду колебаний 55 мкм, частоту 22912 Гц, а также нагрузку, которая варьировалась дискретно в диапазоне 7,845...86,295 Н, что соответствовало 11 экспериментальным группам с шагом 7,845 Н.

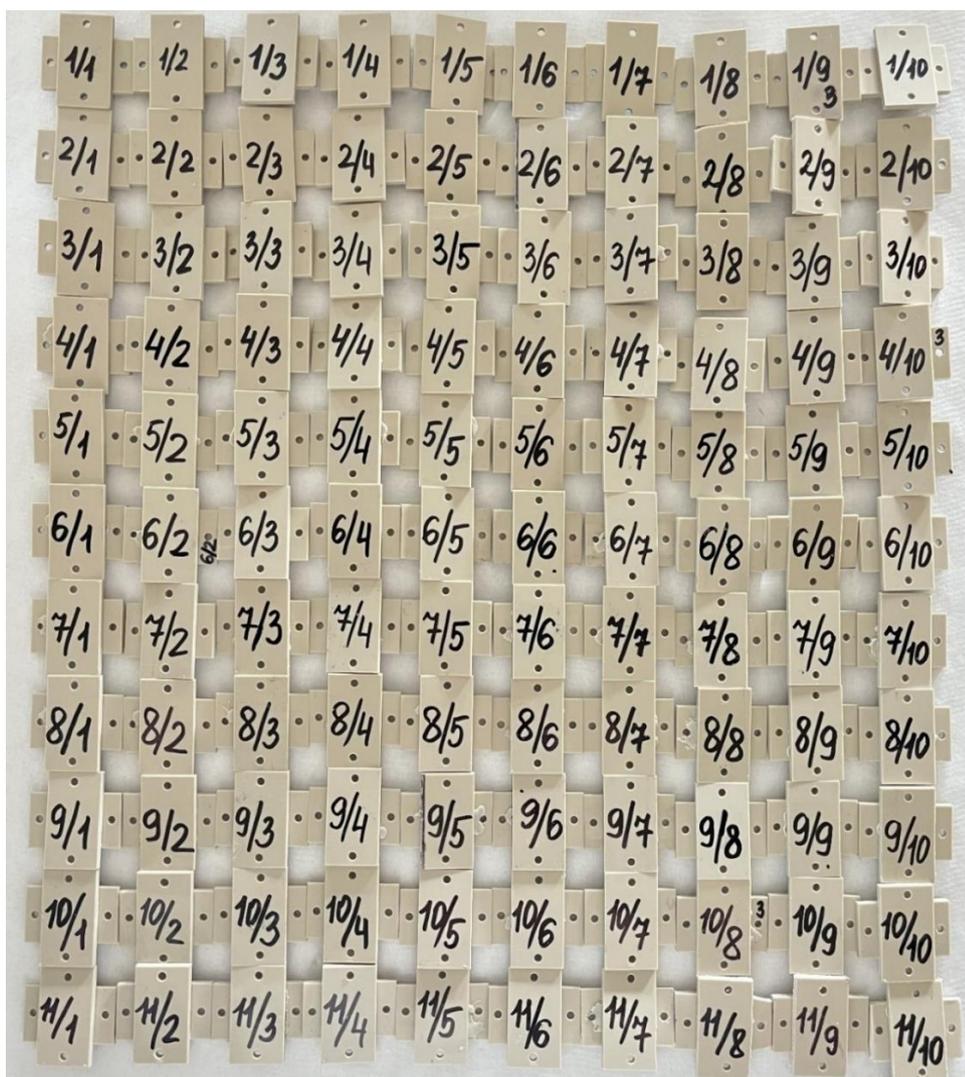


Рисунок 29 – Образцы сварных соединений полипропилена

В рамках проведенного эксперимента осуществлено формирование 110 сварных соединений полипропилена (рисунок 29) типа «внахлест» с

контролируемой глубиной проникновения сварочного инструмента (4 мм) и последовательным распределением образцов на 11 групп по 10 образцов.

Для объективной оценки эксплуатационных характеристик полученных соединений требуется выполнение механических испытаний на разрыв.

#### 5.4 Испытание образцов

Механические испытания проводились на базе АО «АВТОВАЗ» с применением испытательной установки Zwick / Roell Z010 (рисунок 30).

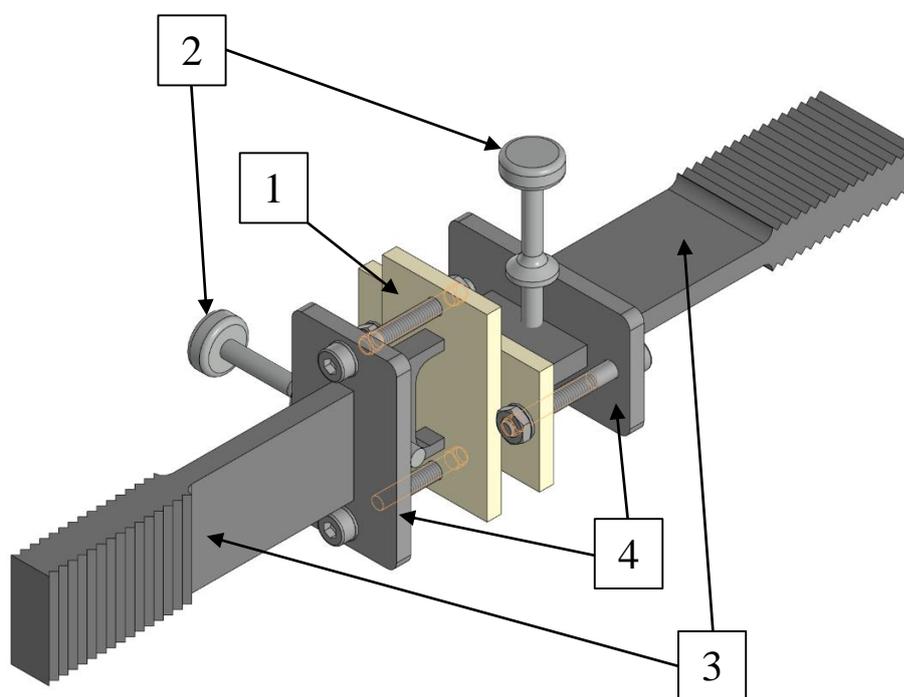


Рисунок 30 – Разрывная машина Zwick / Roell Z010

Модель испытательной машины характеризуется пределом допускаемой погрешности, не превышающим  $\pm 0,5\%$  от измеряемых величин. Данный

параметр соответствует регламентированным техническим стандартам, особенностью устройства является высокая точность регистрации положения и линейных перемещений траверсы, с дискретностью до пятого десятичного знака, что подтверждает возможность фиксации минимальных изменений положения в ходе исследований.

Крепление образцов в испытательной установке осуществлялось при помощи специально спроектированного приспособления (рисунок 31). В рамках данной работы были доработаны зажимные пластины (3).



1 – сваренные образцы (полипропилен); 2 – стопорные пальцы (Д16Т);  
3 – зажимные пластины (Сталь 20); 4 – упорно-усиливающие пластины (Сталь 20)

Рисунок 31 – Приспособление для крепления образцов в испытательную машину

Испытательная процедура предусматривает механическое крепление сварных образцов в фиксирующем приспособлении при помощи винтов с последующей установкой конструкции в тисках испытательной машины. На

подготовительном этапе осуществляется программная калибровка, настройка исходного положения между траверсами (118 мм) и скорость испытания (50 мм/мин), с использованием компьютерного интерфейса управления. После позиционирования выполняется обнуление показателей силовой нагрузки для компенсации начальных напряжений системы. Приложение испытательной нагрузки производится в режиме контролируемого нагружения с поэтапным увеличением усилия до номинального значения 10 кН.

Программный комплекс testXpert II (рисунок 32), интегрированный в испытательную систему, реализует функционал синхронной визуализации экспериментальных данных в цифровом и графическом форматах. В процессе испытаний осуществляется непрерывная регистрация значений механических параметров с параллельным построением диаграммы зависимости приложенного усилия от величины деформации образца. Графическое представление данных формируется в режиме реального времени на основе обработки сигналов датчиков, что обеспечивает оперативный мониторинг характеристик материала.

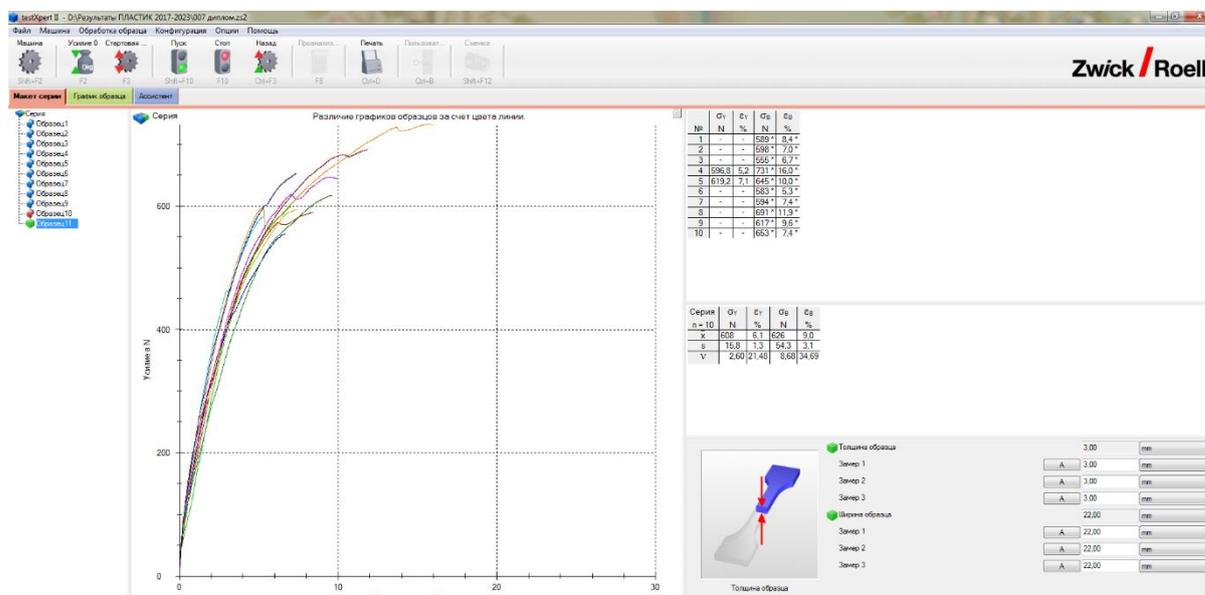


Рисунок 32 – Интерфейс программного обеспечения testXpert II

Возможность одновременного отображения количественных показателей и их графической интерпретации способствует проведению первичного анализа корреляции между механическим воздействием и реакцией материала. Диаграмма «усилие-деформация» служит инструментом для идентификации ключевых точек на кривой нагружения, включая пределы пропорциональности и текучести, без необходимости постобработки данных.

На рисунке 33 продемонстрирован последовательный процесс механических испытаний.

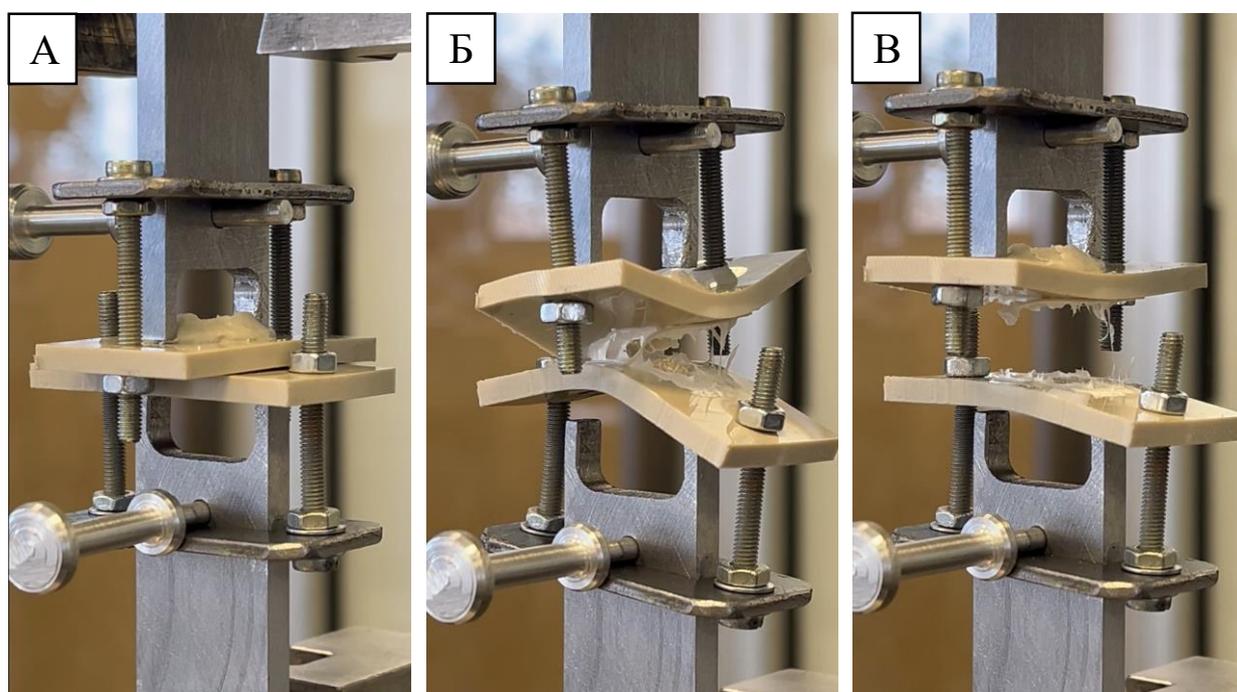


Рисунок 33 – Образцы во время механических испытаний  
а – до разрушения; б – в процессе разрушения; в – после разрушения

### Выводы

1. В качестве материала исследования выбран листовой полипропилен марки «Бален» 01030.
2. Для создания контактного давления рабочего торца сварочного инструмента на образцы выбран метод рычага в рамках прикладной механики.

3. Спроектирована 3D модель технологической оснастки, выполненной в программной среде SolidWorks.
4. Производство компонентов оснастки (призмы, рычажного механизма и подвесной системы для дозирования нагрузки) осуществлено с использованием производственных мощностей АО «АВТОВАЗ».
5. Изготовлены 220 заготовок из полипропилена с использованием фрезерного станка 67К25.
6. В качестве сварочного инструмента была выбрана насадка с двухступенчатым торцом № 07 (Основание выбора – ВКР Еник В.В. [15]).
7. Обоснован выбор диапазона экспериментального нагружения образцов во время ультразвуковой сварки – 0,2...2,2 кг.
8. На базе Тольяттинского государственного университета (ТГУ) проведена ультразвуковая сварка 220 образцов изменяя нагрузку с дискретностью 0,2 кг на группу. Создано 110 сварных соединений внахлест.
9. Доработано приспособление выполняющее промежуточное звено между креплением образцов и испытательной машиной.
10. Выполнены механические испытания сварных соединений на разрывной машине Zwick/Roell Z010 с регистрацией данных в программном комплексе testXpert II.

## **6      Обработка экспериментальных данных**

Экспериментальные исследования требуют систематизированной обработки, анализа и интерпретации данных для формирования научно обоснованных выводов. В рамках данной главы предстоит последовательно преобразовать первичную информацию в структурированное знание, начиная с визуального представления данных – ключевого этапа выявления их структуры и закономерностей. После структурирования данных перейдем к этапу описательной статистики, сводящей информацию к ключевым показателям центральной тенденции и изменчивости, а также предусматривающей проверку качества данных, включая оценку нормальности распределения и обработку аномальных значений. Далее предстоит перейти к статистическому анализу, направленному на проверку гипотез с использованием критериев значимости, интерпретацию результатов через призму уровня значимости и оценку точности данных с помощью доверительных интервалов. На следующем этапе будет рассмотрен корреляционный анализ, позволяющий количественно оценить взаимосвязи между переменными, однако важно учитывать, что корреляция не подразумевает причинно-следственную связь. Заключительным этапом станет регрессионный анализ, направленный на моделирование зависимостей между переменными, оценку влияния и проверку адекватности моделей с учетом условий их применимости.

### **6.1 Представление и анализ первичных данных**

В таблицах 5...15 представлены технологические (время сварки) и прочностные (усилие отрыва, относительное удлинение, площадь контакта) характеристики сварных соединений.

На рисунках 34...44 показаны диаграммы разрыва образцов каждой группы.

Таблица 5 – Экспериментальные результаты группы образцов № 1

№ Группа/ Серия	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Деформация, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
1/1	11,3	234,0	7,8	19,0
1/2	10,6	151,0	5,5	23,7
1/3	11,3	211,0	8,1	25,2
1/4	11,7	247,0	8,4	18,3
1/5	14,3	229,0	8,6	22,8
1/6	12,4	145,0	5,6	26,4
1/7	11,8	243,0	9,5	19,7
1/8	12,5	234,0	8,8	21,9
1/9	17,0	290,0	12,6	23,6
1/10	13,9	262,0	15,1	23,9
Среднее	12,7	224,6	9,0	22,4

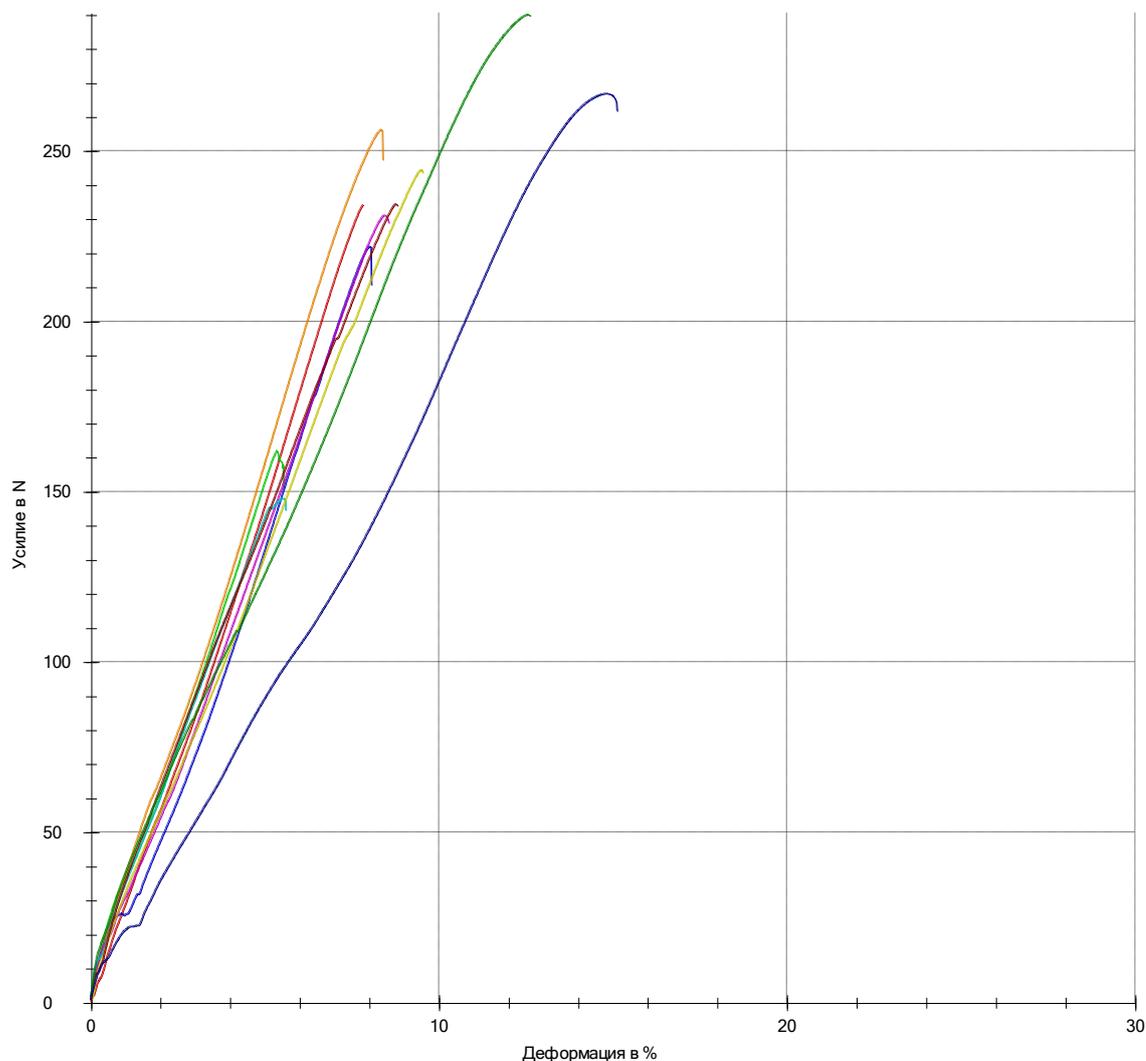


Рисунок 34 – Диаграмма растяжения группы образцов № 1

Таблица 6 – Экспериментальные результаты группы образцов № 2

№ Группа/ Серия	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Деформация, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
2/1	6,1	188,0	7,6	21,9
2/2	6,4	224,0	9,1	22,7
2/3	6,6	261,0	10,7	27,0
2/4	7,0	205,0	7,9	19,1
2/5	7,8	225,0	10,7	18,2
2/6	6,6	259,0	6,6	68,8
2/7	6,0	211,0	10,6	19,5
2/8	5,8	166,0	9,3	16,9
2/9	6,5	240,0	15,2	59,7
2/10	6,7	201,0	6,2	19,6
Среднее	6,6	218,0	9,4	29,3

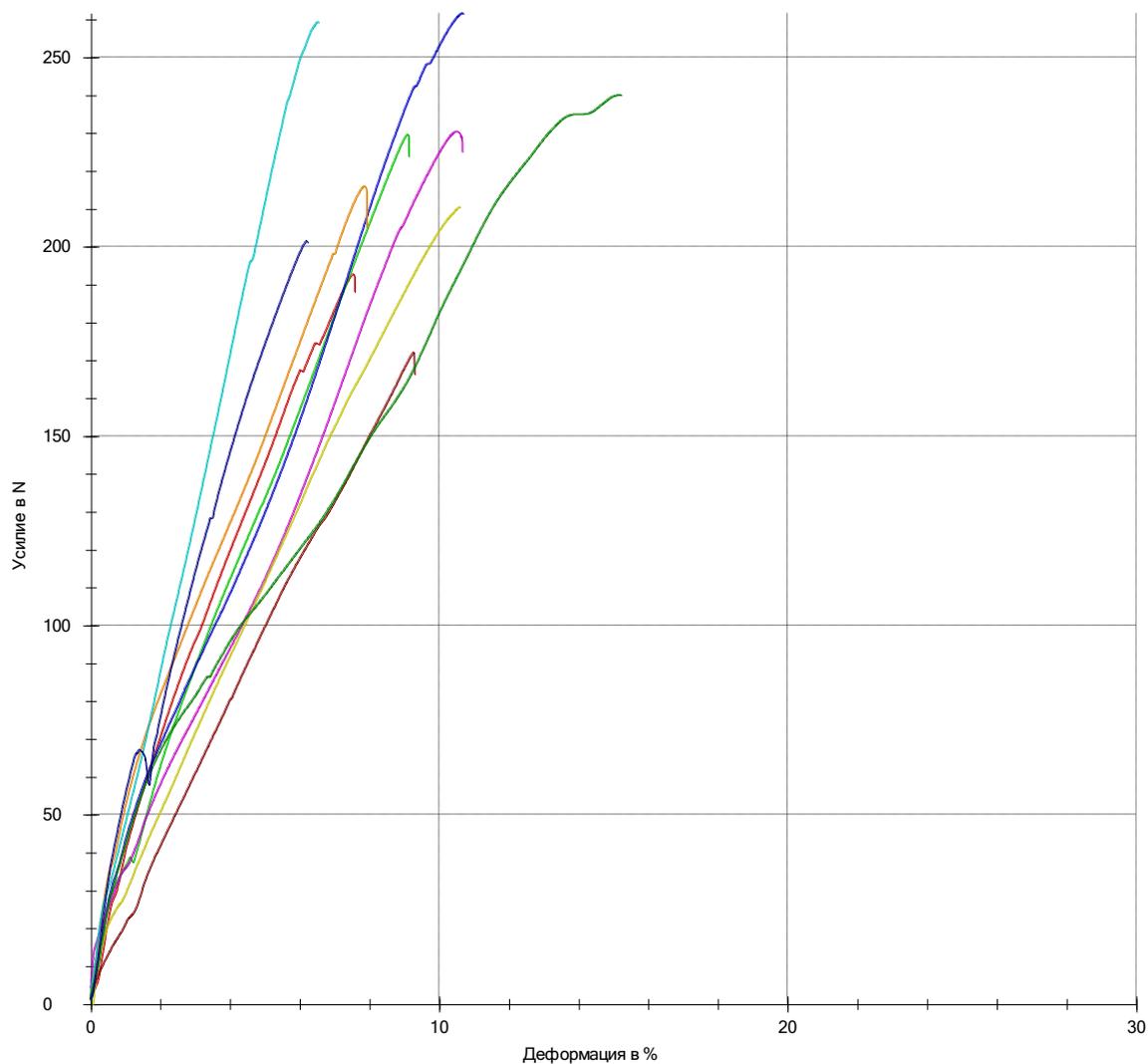


Рисунок 35 – Диаграмма растяжения группы образцов № 2

Таблица 7 – Экспериментальные результаты группы образцов № 3

№ Группа/ Серия	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Деформация, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
3/1	4,8	324,0	10,3	47,5
3/2	5,2	361,0	11,4	71,9
3/3	5,4	475,0	15,8	97,7
3/4	5,3	292,0	8,9	32,5
3/5	5,2	360,0	11,1	56,7
3/6	5,5	196,0	6,2	17,5
3/7	5,4	351,0	10,6	46,1
3/8	5,3	369,0	10,5	72,3
3/9	5,3	391,0	10,2	91,5
3/10	5,9	385,0	11,0	66,3
Среднее	5,3	350,4	10,6	60,0

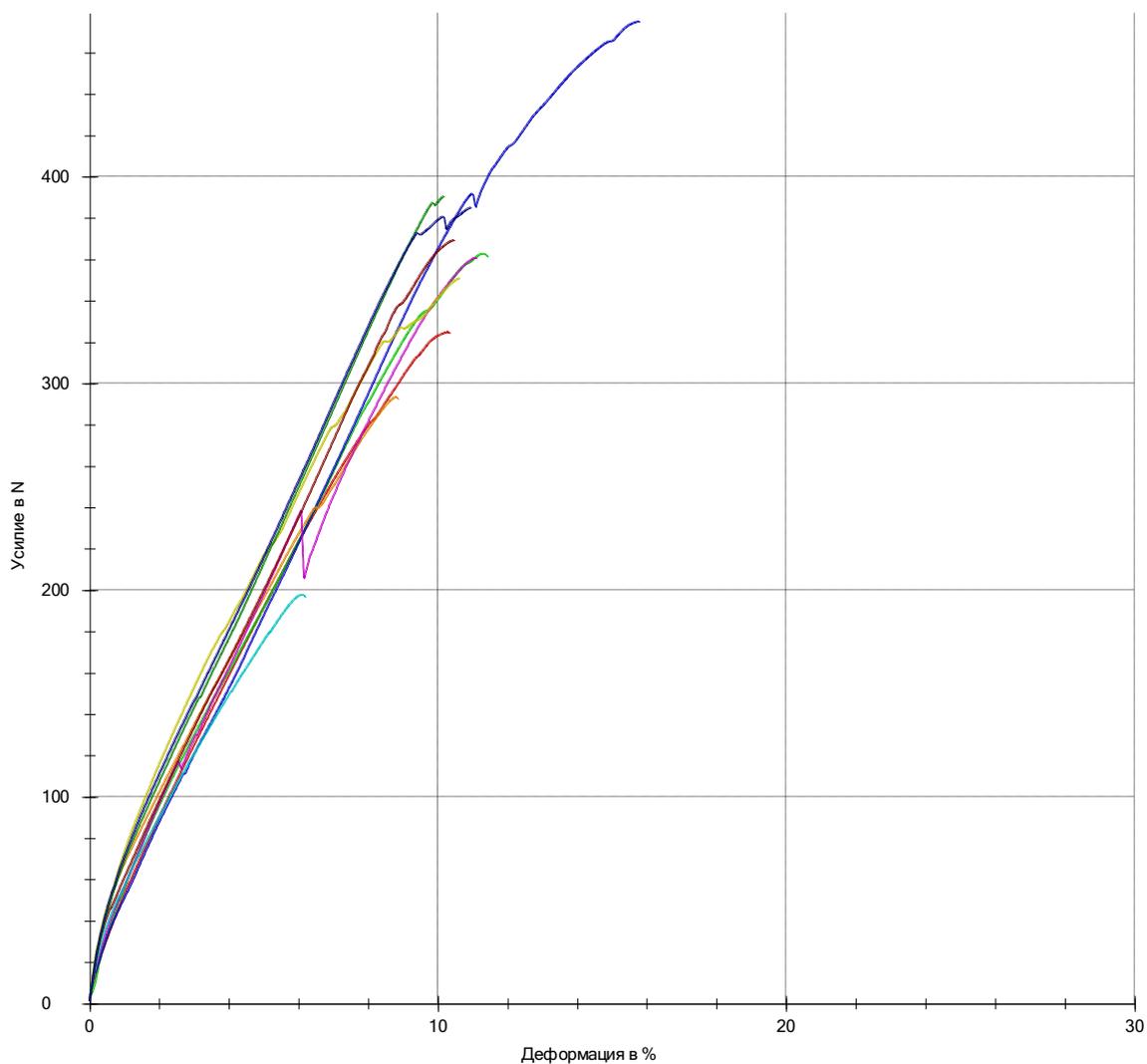


Рисунок 36 – Диаграмма растяжения группы образцов № 3

Таблица 8 – Экспериментальные результаты группы образцов № 4

№ Группа/ Серия	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Деформация, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
4/1	4,2	490,0	4,8	115,9
4/2	4,2	484,0	7,4	66,3
4/3	4,4	336,0	4,3	135,9
4/4	4,9	642,0	7,8	61,3
4/5	5,0	362,0	4,8	89,8
4/6	4,9	463,0	8,5	71,0
4/7	4,9	397,0	5,2	61,8
4/8	5,2	308,0	2,9	48,3
4/9	4,9	489,0	7,3	62,8
4/10	5,3	374,0	5,4	37,6
Среднее	4,8	434,5	5,8	75,1

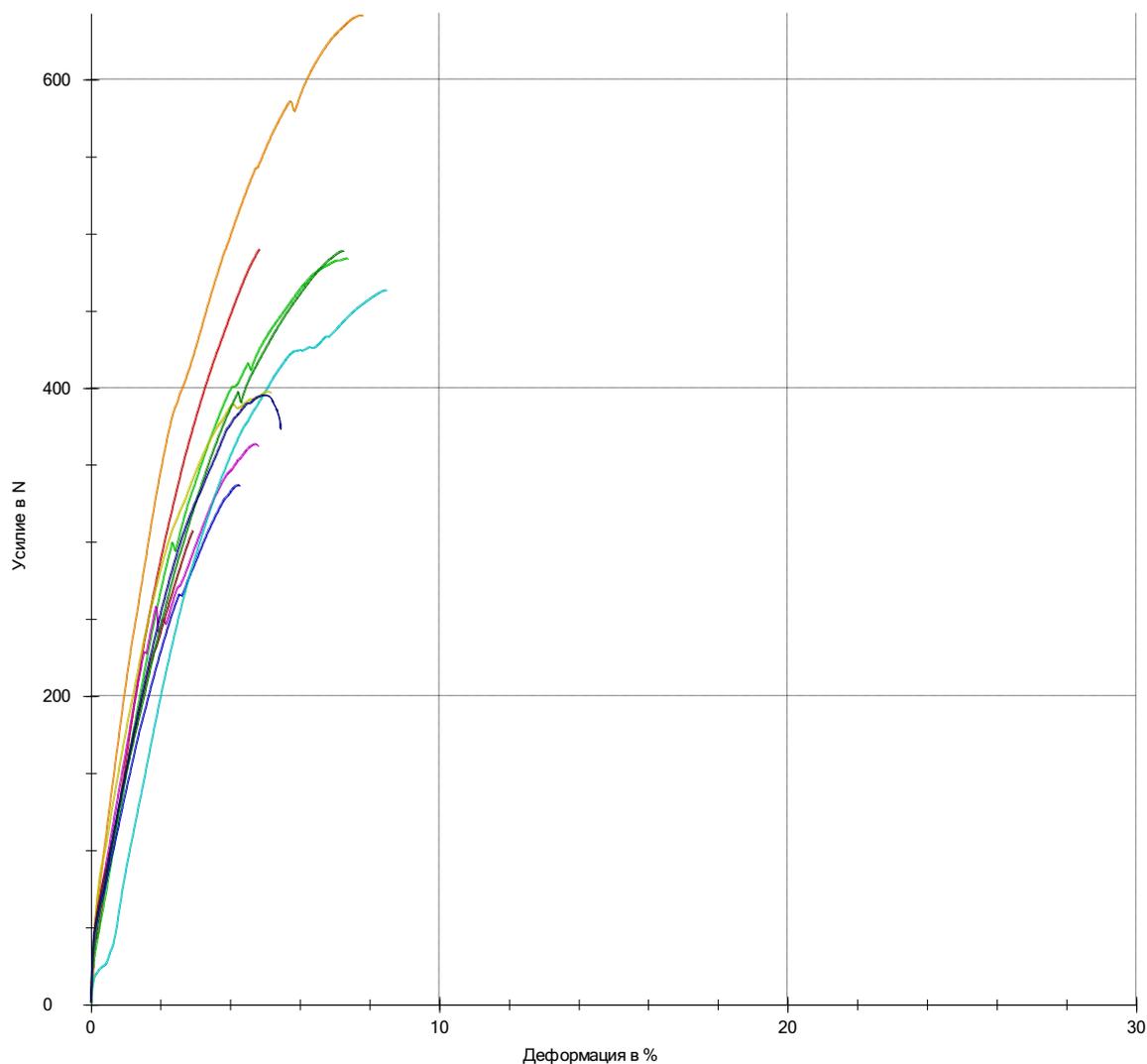


Рисунок 37 – Диаграмма растяжения группы образцов № 4

Таблица 9 – Экспериментальные результаты группы образцов № 5

№ Группа/ Серия	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Деформация, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
5/1	4,6	585,0	8,6	124,4
5/2	4,2	675,0	13,3	156,5
5/3	4,1	517,0	6,7	96,4
5/4	3,8	715,0	13,0	151,2
5/5	4,0	601,0	10,1	112,1
5/6	4,0	553,0	8,3	110,1
5/7	4,1	629,0	11,8	108,0
5/8	4,0	563,0	8,5	132,4
5/9	3,7	581,0	8,6	87,3
5/10	4,6	657,0	13,1	104,2
Среднее	4,1	607,6	10,2	118,3

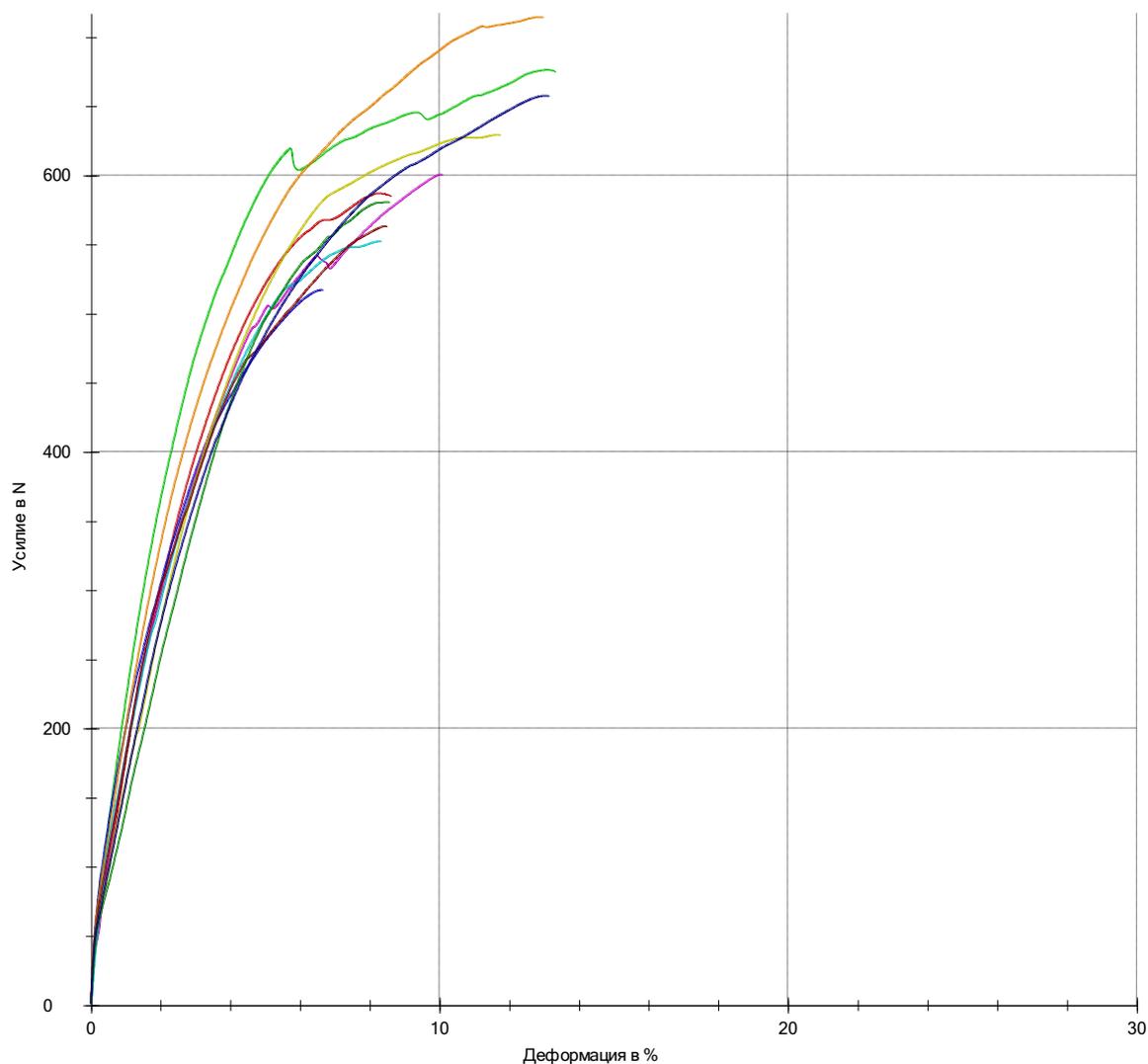


Рисунок 38 – Диаграмма растяжения группы образцов № 5

Таблица 10 – Экспериментальные результаты группы образцов № 6

№ Группа/ Серия	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Деформация, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
6/1	3,8	681,0	7,1	139,1
6/2	4,0	692,0	11,6	128,1
6/3	3,5	523,0	6,2	107,1
6/4	3,4	600,0	8,5	128,2
6/5	3,5	616,0	11,0	121,1
6/6	3,7	811,0	22,0	158,2
6/7	3,8	675,0	11,2	131,8
6/8	3,5	644,0	9,7	112,3
6/9	3,9	587,0	8,2	122,5
6/10	3,7	585,0	8,6	131,7
Среднее	3,7	641,4	10,4	128,0

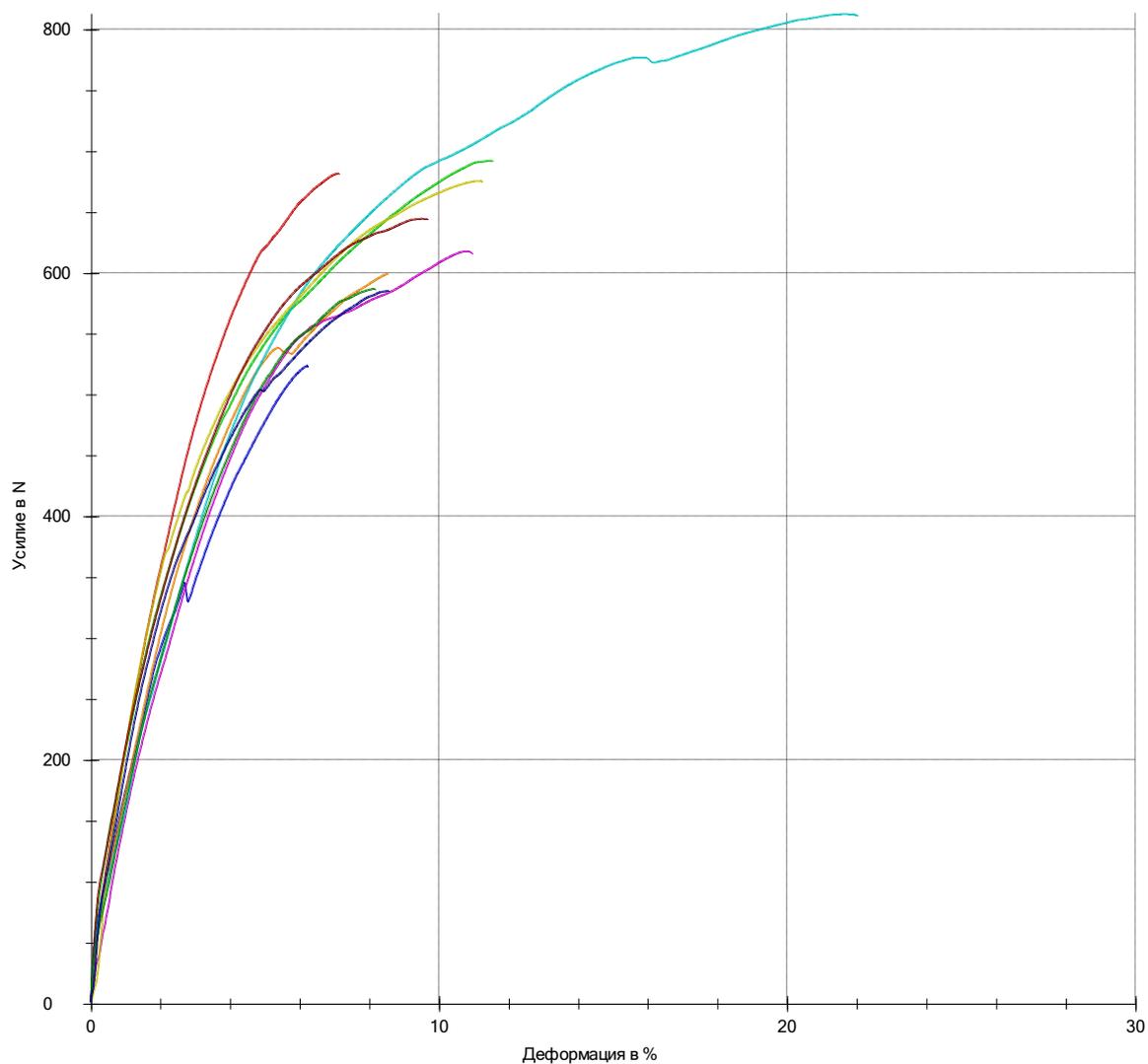


Рисунок 39 – Диаграмма растяжения группы образцов № 6

Таблица 11 – Экспериментальные результаты группы образцов № 7

№ Группа/ Серия	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Деформация, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
7/1	3,6	589,0	8,4	159,3
7/2	4,9	598,0	7,0	166,5
7/3	3,6	555,0	6,7	163,1
7/4	3,7	731,0	16,0	203,6
7/5	2,9	645,0	10,0	220,0
7/6	3,3	583,0	5,3	249,9
7/7	3,1	594,0	7,4	139,2
7/8	2,9	691,0	11,9	156,0
7/9	2,9	617,0	9,6	127,5
7/10	2,9	653,0	7,4	140,0
Среднее	3,4	625,6	9,0	172,5

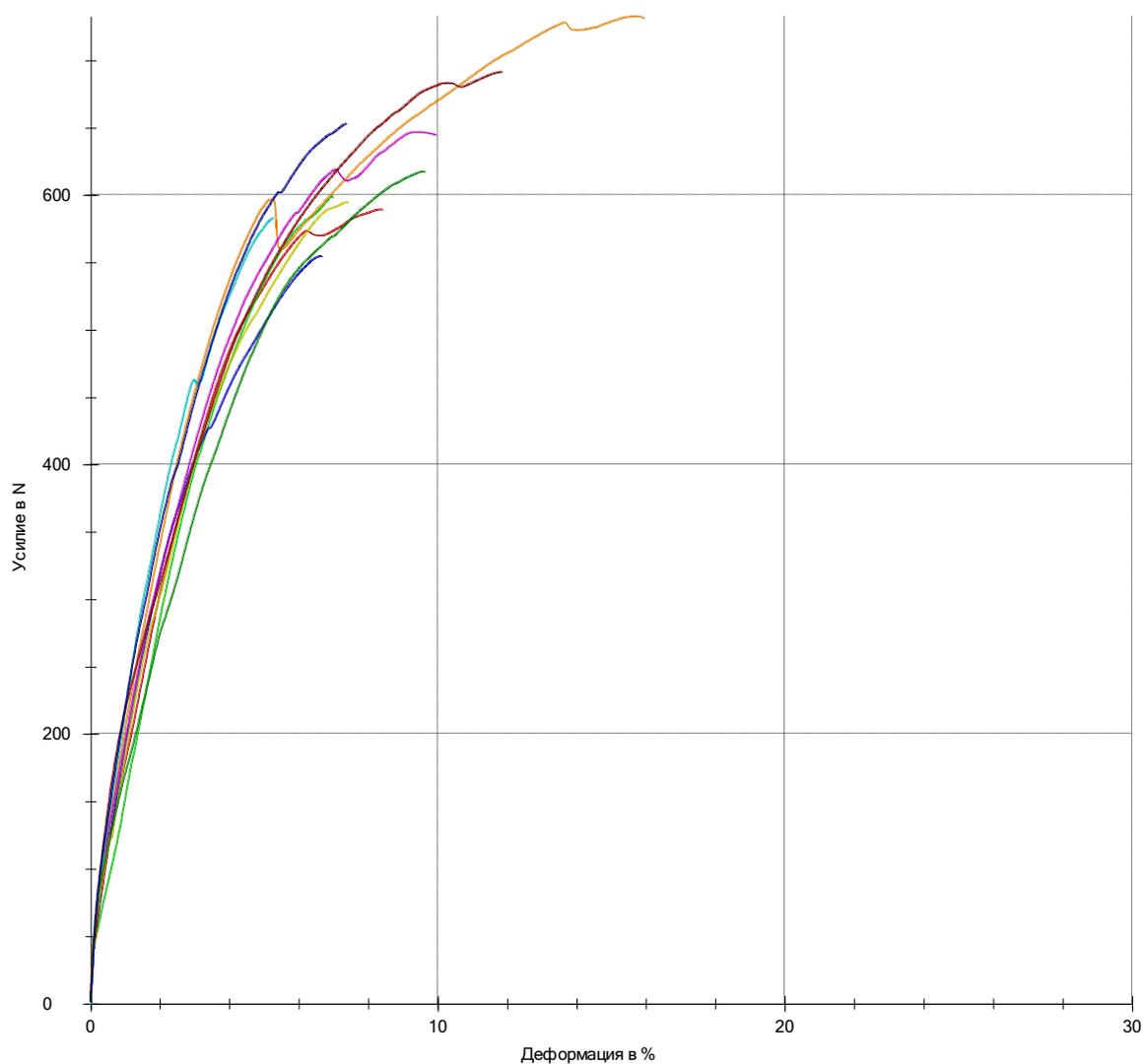


Рисунок 40 – Диаграмма растяжения группы образцов № 7

Таблица 12 – Экспериментальные результаты группы образцов № 8

№ Группа/ Серия	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Деформация, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
8/1	3,1	654,0	10,0	213,7
8/2	3,0	639,0	9,8	124,5
8/3	3,0	667,0	10,0	210,2
8/4	3,1	603,0	8,6	153,5
8/5	2,8	751,0	19,4	231,5
8/6	3,2	709,0	8,4	226,6
8/7	2,7	734,0	12,7	210,0
8/8	3,0	541,0	8,0	171,3
8/9	2,9	615,0	5,8	160,5
8/10	3,1	767,0	13,2	171,2
Среднее	3,0	668,0	10,6	187,3

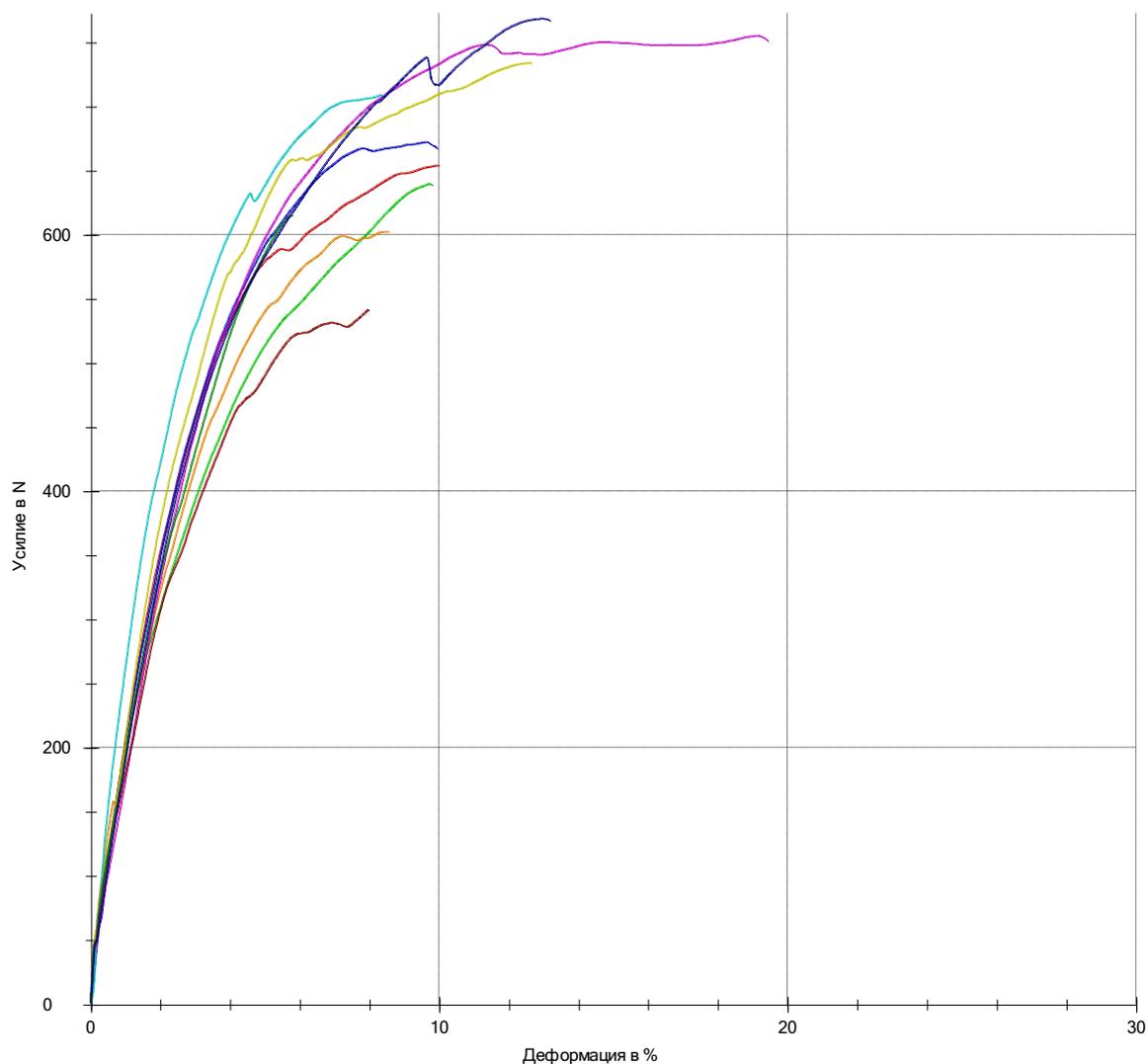


Рисунок 41 – Диаграмма растяжения группы образцов № 8

Таблица 13 – Экспериментальные результаты группы образцов № 9

№ Группа/ Серия	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Деформация, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
9/1	3,1	543,0	7,7	178,1
9/2	2,7	616,0	5,9	246,7
9/3	2,9	691,0	9,5	176,0
9/4	2,8	565,0	7,3	210,5
9/5	2,6	625,0	9,1	207,5
9/6	2,9	664,0	7,2	203,9
9/7	2,9	615,0	8,5	235,1
9/8	2,7	676,0	8,2	169,6
9/9	3,1	639,0	8,6	208,6
9/10	2,8	562,0	8,7	157,0
Среднее	2,9	619,6	8,1	199,3

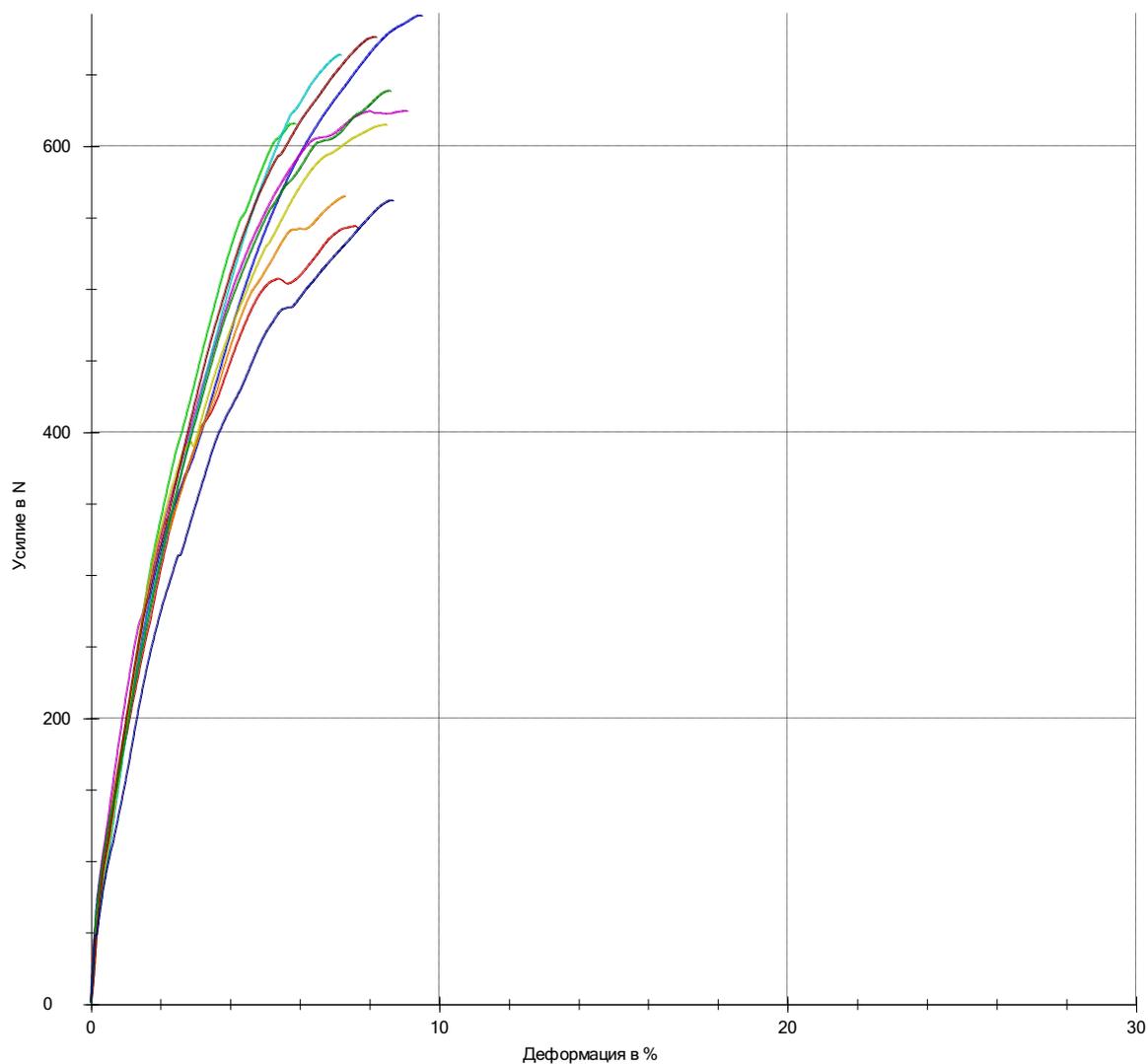


Рисунок 42 – Диаграмма растяжения группы образцов № 9

Таблица 14 – Экспериментальные результаты группы образцов № 10

№ Группа/ Серия	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Деформация, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
10/1	3,0	729,0	11,4	207,1
10/2	2,9	782,0	12,1	209,2
10/3	2,8	705,0	8,3	200,4
10/4	2,9	666,0	6,3	221,4
10/5	2,9	559,0	7,2	181,5
10/6	3,2	585,0	5,2	192,4
10/7	3,1	585,0	5,7	164,8
10/8	2,8	703,0	10,3	199,1
10/9	2,8	688,0	9,3	193,8
10/10	2,9	733,0	10,3	193,0
Среднее	2,9	673,5	8,6	196,3

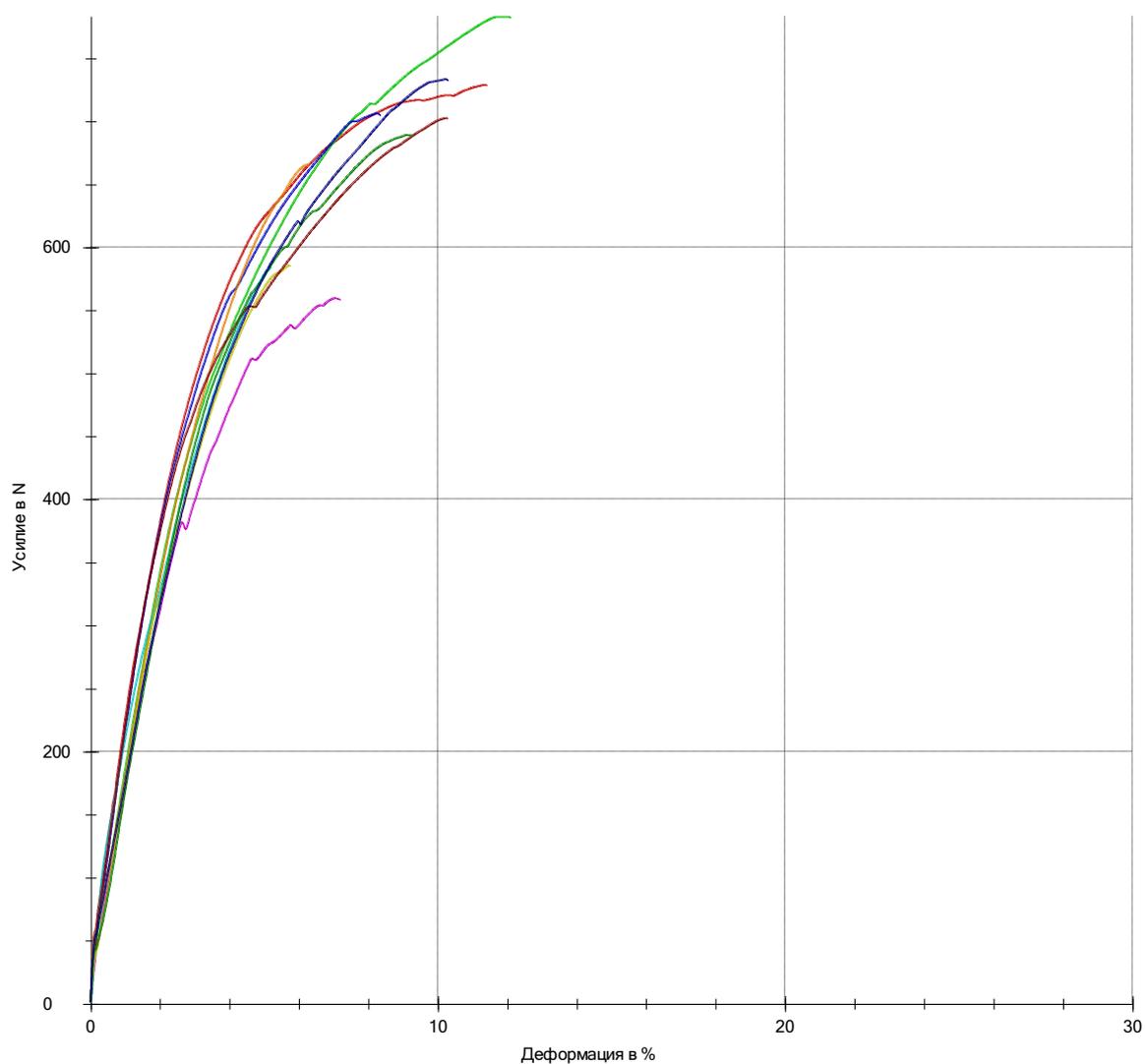


Рисунок 43 – Диаграмма растяжения группы образцов № 10

Таблица 15 – Экспериментальные результаты группы образцов № 11

№ Группа/ Серия	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Деформация, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
11/1	2,7	620,0	7,4	171,4
11/2	2,9	613,0	6,1	216,8
11/3	2,7	690,0	11,3	173,0
11/4	2,7	573,0	7,3	166,9
11/5	3,0	670,0	12,0	151,9
11/6	2,8	630,0	5,8	184,2
11/7	2,9	662,0	7,8	153,0
11/8	2,8	512,0	6,9	119,3
11/9	2,7	798,0	11,4	172,8
11/10	2,7	622,0	7,8	138,0
Среднее	2,8	648,9	8,4	164,7

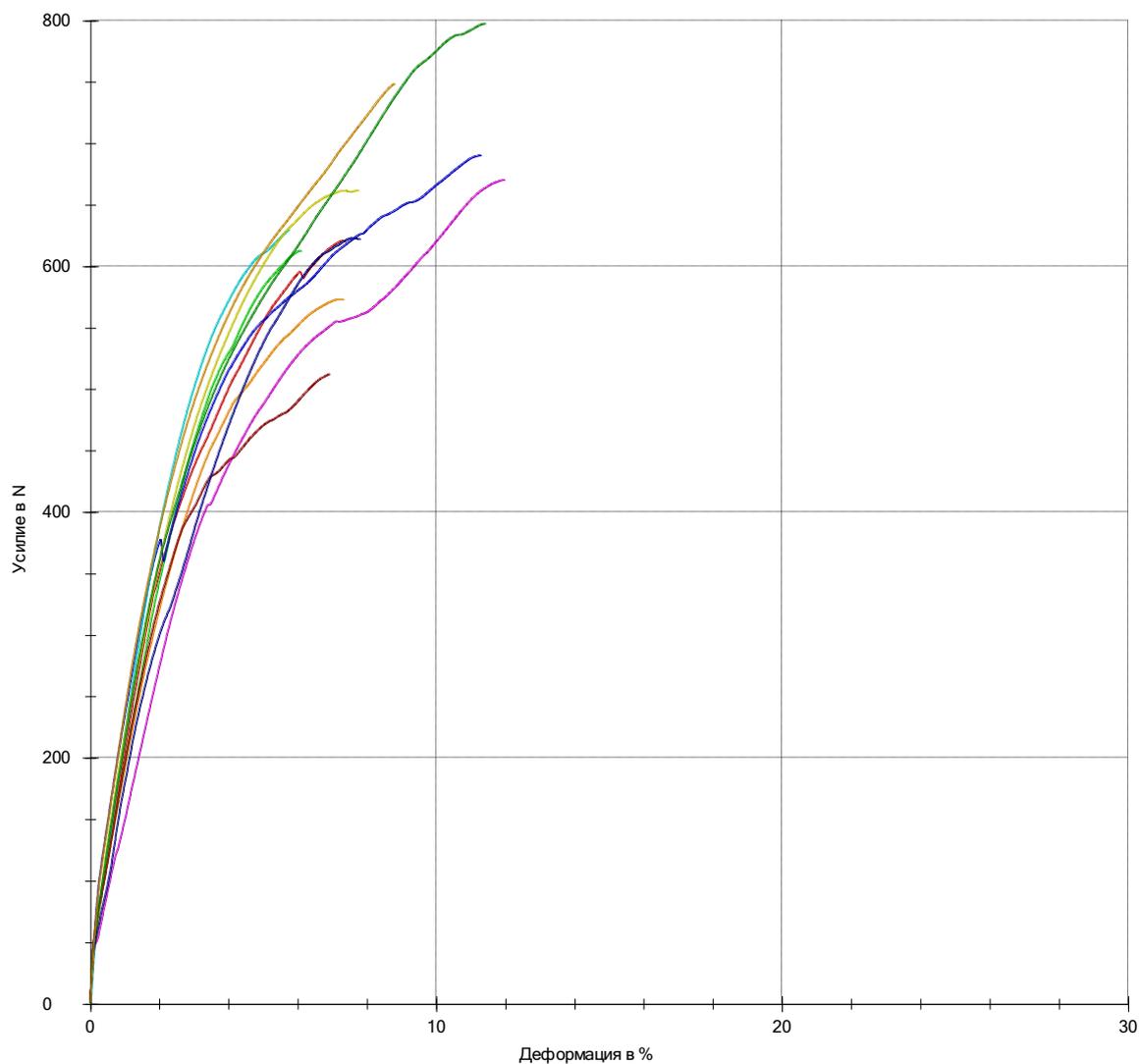


Рисунок 44 – Диаграмма растяжения группы образцов № 11

Проведение разрушающих испытаний сварных соединений позволило идентифицировать морфологические изменения в зонах термического воздействия, сформированных в процессе ультразвуковой точечной сварки. На рисунках 45...47 представлены образцы 1,5 и 10 групп после разрыва.

Повышение прилагаемой нагрузки в процессе сварки обуславливает возрастание площади формируемого шва вследствие распространения расплава полимера за пределы зоны термического воздействия инструмента.

Отмечено [6], что если давление на контактных поверхностях распределено равномерно (когда поверхности глянцевые), то сварку пластин из мягких пластмасс по границе раздела выполнить практически невозможно. В этом случае на поверхностях раздела создают энергетические концентраторы в виде каких-либо выступов, которые плавятся в процессе сварки.



Рисунок 45 – Образцы 1 группы после разрыва ( $F_{пр} = 7,845 \text{ Н}$ )



Рисунок 46 – Образцы 5 группы после разрыва ( $F_{пр} = 39,225 \text{ Н}$ )

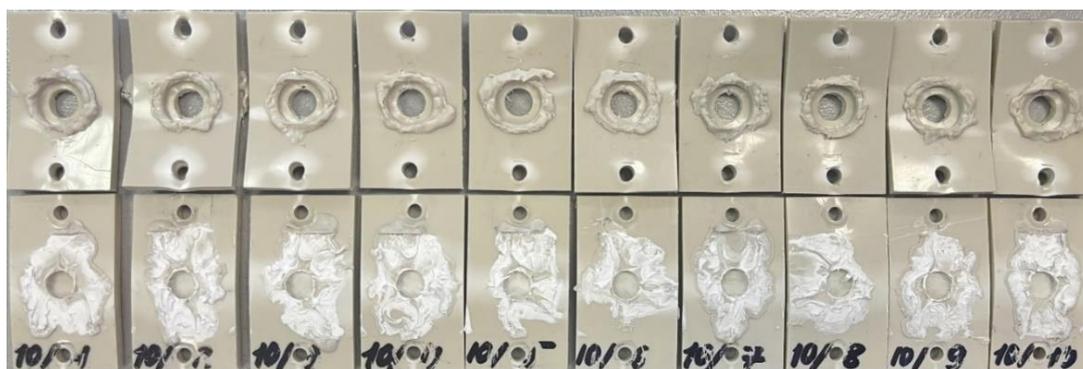
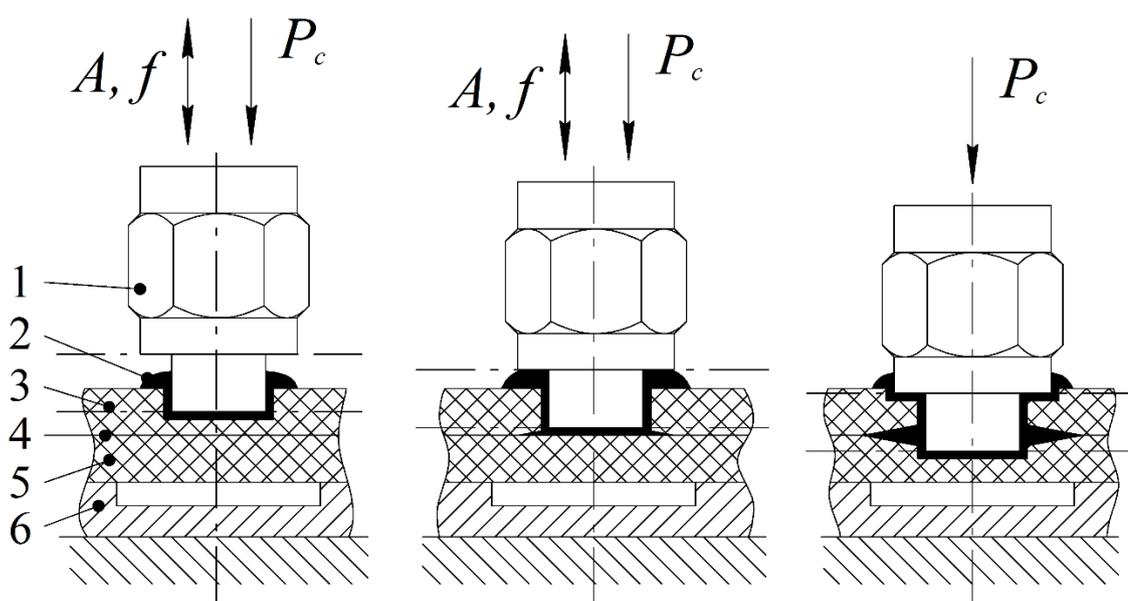


Рисунок 47 – Образцы 10 группы после разрыва ( $F_{пр} = 78,45 \text{ Н}$ )

В работе Е.Б. Савиной [26] показано, что пластмасса, находящаяся в вязкотекучем состоянии, попадает в зазор, образующийся между свариваемыми пластинами при внедрении РЧСИ глубже границы раздела (рисунок 48).



1 – одноступенчатая РЧСИ, 2 – вытесняемый расплав (вязкотекучее состояние пластмассы), 3 – верхняя пластина, 4 – граница раздела контактных глянцевых поверхностей, 5 – нижняя пластина, 6 – пластина торцевой жесткости

Рисунок 48 – Схема вытекания расплава в процессе УЗС:

Установлено, что повышение прилагаемой нагрузки при сокращении времени сварки ингибирует миграцию расплава полимера в поверхностный

слоем, обеспечивая аккумуляцию его объема в зоне контакта свариваемых поверхностей. Данная корреляция параметров способствует оптимизации механической прочности соединения, что подтверждается экспериментальными данными.

Морфология разрушения в зоне разрыва (рисунки 45...47), проявляющаяся в виде зон локальной деформации с изменением оптических характеристик (побеление) и нерегулярной текстуры поверхности (рваная поверхность), свидетельствует о деструкции промежуточного слоя, сформированного вследствие активированных ультразвуком диффузионных процессов при сварке.

## 6.2 Статистическая обработка результатов эксперимента

Верификация достоверности результатов исследований выполнена методом статистического анализа в соответствии с ГОСТ 14359. Из каждой серии данных исключались аномальные значения, соответствующие экстремальным точкам выборки, с последующим расчётом границ доверительного интервала для искомого параметра при вероятности 95%. Проведена проверка соответствия исключённых значений допустимым диапазонам, рассчитанным на основе оставшегося массива данных. Статистически нерепрезентативные измерения отбраковывались с применением критерия Шовене [29]. На заключительном этапе выполнено определение достоверных индивидуальных значений показателей согласно требованиям, ГОСТ 14359.

Среднее арифметическое значение  $\bar{X}$  рассчитываем по формуле (6):

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N}, \quad (6)$$

где  $X_i$  – одно из значений определяемой величины,  $N$  – количество отдельных

значений, участвующих в расчете.

Стандартное отклонение выборки  $S$  рассчитываем по формуле (7):

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}. \quad (7)$$

Следующим необходимым пунктом является расчёт модуля отклонения  $Z$  по формуле (8):

$$Z = \frac{|X_i - \bar{X}|}{S}, \quad (8)$$

где,  $Z$  – относительное отклонение случайной величины  $X_i$  от её среднего значения в единицах среднеквадратического отклонения,  $M$  – число ожидаемых измерений, начиная с которого отклонение  $Z$  не может считаться промахом.

Расчитанный модуль мы сравниваем с табличным значением отбора промахов, если  $M > N$ , то значение выборки  $X_i$  считается промахом.

В случае, если после отброса аномального значения и перерасчета модуля отклонения  $Z$  наблюдаются аномальные значения, они также отбрасываются до тех пор, пока величина модуля не будет соответствовать требованию  $M > N$ .

После отброса промахов, вычислим вероятное отклонение искомого показателя  $X$  по формуле (9):

$$\Delta X = \frac{t \cdot S}{\sqrt{N}}, \quad (9)$$

где  $t$  – критерий точности по ГОСТ 14359

Вычислим границы доверительного интервала по формуле (10):

$$X = \bar{X} \pm \Delta X. \quad (10)$$

Далее определим относительную ошибку  $\xi$  по формуле (11):

$$\xi = \frac{\Delta X}{\bar{X}} \cdot 100\%. \quad (11)$$

В таблицах 16 и 17 представлены усреднённые экспериментальные данные, обработанные методами статистического анализа для каждой исследуемой группы, а также значения средней ошибки аппроксимации.

Таблица 16 – Экспериментальные данные после статистической обработки

№ Группы	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Деформация, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
1	12,20±0,94	224,6±32,6	7,8±1,2	22,4±1,9
2	6,41±0,29	218,0±21,6	8,7±1,3	19,7±1,9
3	5,33±0,09	363,0±20,9	10,7±0,4	60,0±18,0
4	4,79±0,28	411,4±54,7	5,8±1,3	68,4±13,3
5	4,11±0,21	607,6±43,6	10,2±1,7	118,3±16,2
6	3,68±0,14	622,6±42,6	9,1±1,4	124,7±7,7
7	3,21±0,26	625,6±38,8	8,2±1,5	163,9±23,2
8	2,99±0,11	668,0±51,6	9,6±1,8	187,3±25,6
9	2,85±0,12	619,6±36,1	8,3±0,6	199,3±20,6
10	2,88±0,06	673,5±52,9	8,6±1,7	199,8±8,9
11	2,79±0,08	635,0±31,2	8,4±1,6	158,9±15,7

Средняя ошибка аппроксимации для параметров время сварки и усилие отрыва в исследуемых группах соответствует критерию [24], согласно которому допустимое значение не должно превышать 10–15 %. Однако для некоторых групп следует отметить, что ошибка приближается к верхней границе нормы.

Параметр деформации демонстрирует высокие систематические ошибки, обусловленные значительным разбросом экспериментальных данных, что подтверждается значениями средней ошибки аппроксимации,

превышающими 15 % в большинстве групп. Такая вариативность указывает на неконтролируемые факторы, влияющие на измерения.

Ввиду объемного характера поверхности разрыва оценка её полной площади затруднительна, поэтому измерения ограничивались поверхностным слоем.

Таблица 17 – Средняя ошибка аппроксимации каждой группы

№ Группы	Средняя ошибка аппроксимации $\xi$ , %			
	Время сварки	Усилие отрыва	Деформация	Площадь контакта
1	7,7	14,5	15,8	8,6
2	4,5	9,9	15,4	9,5
3	1,6	5,7	3,9	30,0
4	5,8	13,3	22,1	19,4
5	5,2	7,2	16,9	13,7
6	3,9	6,8	15,9	6,2
7	8,2	6,2	18,9	14,2
8	3,6	7,7	18,4	13,7
9	4,1	5,8	7,3	10,3
10	2,1	7,9	20,3	4,5
11	2,8	4,9	19,6	9,9

Данные по деформации исключены из дальнейших количественных расчетов как статистически ненадежные. Однако они сохранены в качестве иллюстративного материала для визуализации общих тенденций.

Обработка результатов проводилась в программе Excel. Подробная статистическая обработка каждой серии приведена в приложении Б.

### 6.3 Определение усилий, действующих на РЧСИ в процессе УЗС

Средняя скорость внедрения торца рассчитываем по формуле (12):

$$V_g = \frac{h}{t_{ul_i}}, \quad (12)$$

где  $h$  – фиксированный зазор между регулирующим винтом и пластиной ( $h = 4$  мм),  $t_{ul_i}$  – среднее время каждой группы образцов.

Давление в расплаве на границе раздела в зоне сварки вычислим исходя из геометрии РЧСИ по формуле (13):

$$p_T = \frac{k_1 \cdot F_{\Pi}}{S_D}, \quad (13)$$

где  $k_1$  – коэффициент, характеризующий геометрию РЧСИ,  $F_{\Pi}$  – сила прижима,  $S_D$  – площадь торца ступени (кольцо) РЧСИ.

Известно, что если на жидкость действует внешнее давление, то вследствие подвижности молекул это давление передаётся одинаково во все стороны. Заметим, что, в нашем случае, полипропилен остаётся жидким ( $p_1$ ) только когда работает ультразвук:

$$p_1 = \frac{F_1}{S_1}, \quad (14)$$

где,  $F_1$  – реакция на усилие прижима  $F_{\Pi}$ , действующая на торец малого диаметра РЧСИ,  $S_1$  – площадь торца малого диаметра РЧСИ.

Когда ультразвук выключен полипропилен, находящийся на границе раздела, постепенно переходит из вязкотекучего в высокоэластичное состояние. В момент этого перехода на него действует статическое давление ( $p_2$ ) со стороны кольцевого торца ступени РЧСИ:

$$p_2 = \frac{F_2}{S_2}, \quad (15)$$

где,  $F_2$  – реакция на усилие прижима  $F_{\Pi}$ , действующая на торец ступени РЧСИ,  $S_2$  – площадь торца ступени (кольцо) РЧСИ.

Условие равновесия (16) элемента конструкции, включающего зону сварки, определим как сумму проекций всех сил на вертикаль (рисунок 49)

$$F_{\Pi} = F_1 + F_2, \quad (16)$$

где,  $F_1$  – сила прижима торца малого цилиндра ступени (круг),  $F_2$  – сила прижима торца ступени (кольцо).

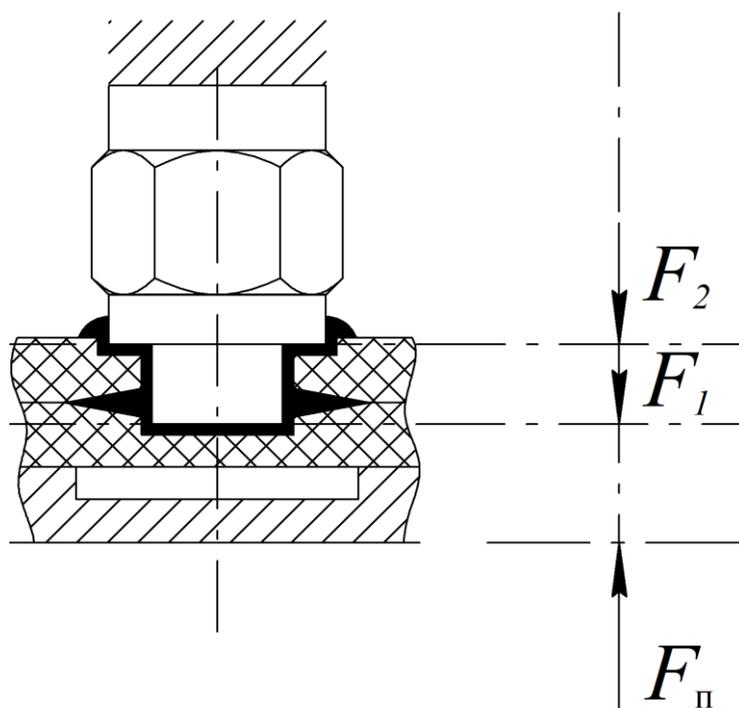


Рисунок 49 – Распределение усилий прижима во время УЗС

Тогда, рассчитаем усилия прижима  $F_1$  и  $F_2$  из уравнения равновесия при условии равенства давлений под нижним и верхним торцами (17 и 18)

$$F_2 = k_1 \cdot F_{\Pi}, \quad (17)$$

$$F_1 = F_{\Pi} - F_2, \quad (18)$$

где,  $F_{\Pi}$  – усилие прижима свариваемых пластин из полипропилена

Определим коэффициент, характеризующий геометрию РЧСИ из уравнения равновесия при условии равенства давлений под нижним и верхним торцами по формуле (19):

$$k_1 = \frac{\frac{S_D}{S_d}}{1 + \frac{S_D}{S_d}} = \frac{\frac{50,265}{28,274}}{1 + \frac{50,265}{28,274}} = 0,64, \quad (19)$$

Рассчитаем нормальные напряжения в зонах контакта при отрыве пластин по формуле (20):

$$\sigma_{\Gamma} = \frac{F_p}{S_p}, \quad (20)$$

Все рассчитанные величины представлены в матрице на рисунке 50. Значения  $t_{ul}$ ,  $F_{II}$ ,  $F_p$ ,  $S_p$  получены экспериментальным путем.

$$M_t := \begin{pmatrix} 12.20 & 7.845 & 0.1 & 0.328 & 224.6 & 22.45 & 10.004 \\ 6.41 & 15.691 & 0.2 & 0.624 & 218.0 & 25.936 & 8.405 \\ 5.33 & 23.536 & 0.3 & 0.750 & 363.0 & 60.01 & 6.049 \\ 4.79 & 31.381 & 0.399 & 0.835 & 411.4 & 68.38 & 6.016 \\ 4.11 & 39.227 & 0.499 & 0.973 & 607.6 & 118.26 & 5.138 \\ 3.68 & 47.072 & 0.599 & 1.087 & 622.6 & 124.66 & 4.994 \\ 3.21 & 54.917 & 0.7 & 1.246 & 625.6 & 163.92 & 3.816 \\ 2.99 & 62.763 & 0.799 & 1.338 & 668.0 & 187.30 & 3.566 \\ 2.85 & 70.608 & 0.899 & 1.404 & 619.6 & 199.31 & 3.109 \\ 2.88 & 78.453 & 0.999 & 1.389 & 673.5 & 199.77 & 3.371 \\ 2.79 & 86.299 & 1.099 & 1.434 & 635.0 & 158.95 & 3.995 \end{pmatrix}$$

Рисунок 50 – Экспериментальные и расчетные данные в матрице Mathcad

- $t_{ul} = M_t^{(0)}$  – время работы ультразвука, с;
- $F_{\Pi} = M_t^{(1)}$  – усилие прижима образцов, Н;
- $p_T = M_t^{(2)}$  – давление в расплаве на границе раздела в зоне сварки МПа;
- $V_g = M_t^{(3)}$  – скорость внедрения РЧСИ в материал, мм/с;
- $F_p = M_t^{(4)}$  – усилие разрыва образцов, Н;
- $S_p = M_t^{(5)}$  – площадь пятен контакта после разрыва пластин, мм<sup>2</sup>;
- $\sigma_T = M_t^{(6)}$  – нормальное напряжение в зонах контакта при отрыве, МПа.

#### **6.4 Построение статистических зависимостей**

В рамках научных исследований ключевым этапом анализа экспериментальных данных является построение статистических зависимостей, позволяющих формализовать эмпирические закономерности. Результаты экспериментов, как правило, носят дискретный характер, что обуславливает необходимость их аппроксимации непрерывными аналитическими функциями. Такие зависимости не только обеспечивают компактное представление данных, но и служат основой для прогнозирования, оптимизации и интеграции в более сложные математические модели.

В представленном исследовании анализ данных и построение регрессионных моделей выполнены с использованием среды автоматизированного проектирования Mathcad. Её алгоритмические инструменты, включая методы наименьших квадратов и нелинейной оптимизации, а также встроенные функции визуализации, обеспечивают высокую точность аппроксимации и интерпретируемость результатов.

##### **6.4.1 Корреляционный анализ результатов**

Наибольший научный интерес в рамках данной работы представляют собой следующие виды зависимостей:

- 1) Время работы ультразвука от усилия прижима образцов.
- 2) Скорость внедрения торца насадки от усилия прижима.
- 3) Усилие разрыва образцов от усилия прижима.

На основе экспериментальных данных, систематизированных в матрице (рисунок 50), построим и проанализируем диаграммы рассеяния (рисунки 51...53).

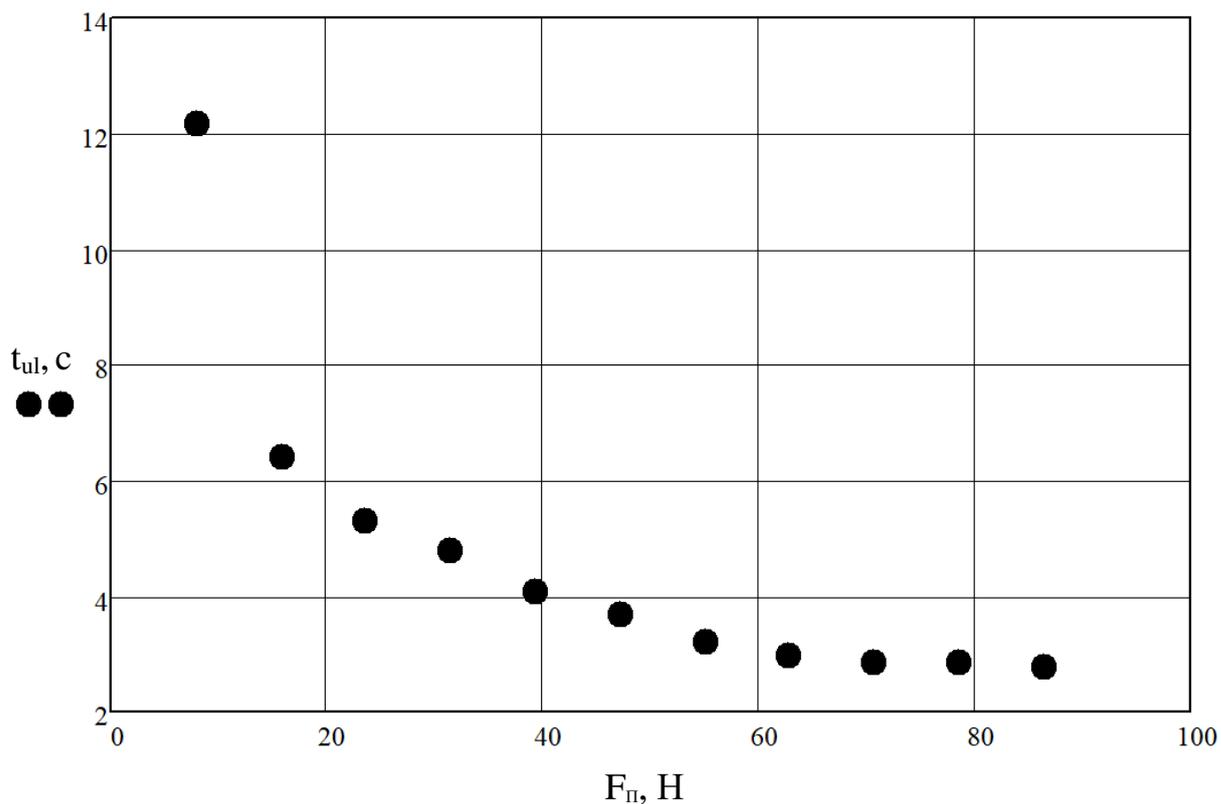


Рисунок 51 – Диаграмма рассеяния времени работы ультразвука от усилия прижима ( $t_{ul}(F_{п})$ )

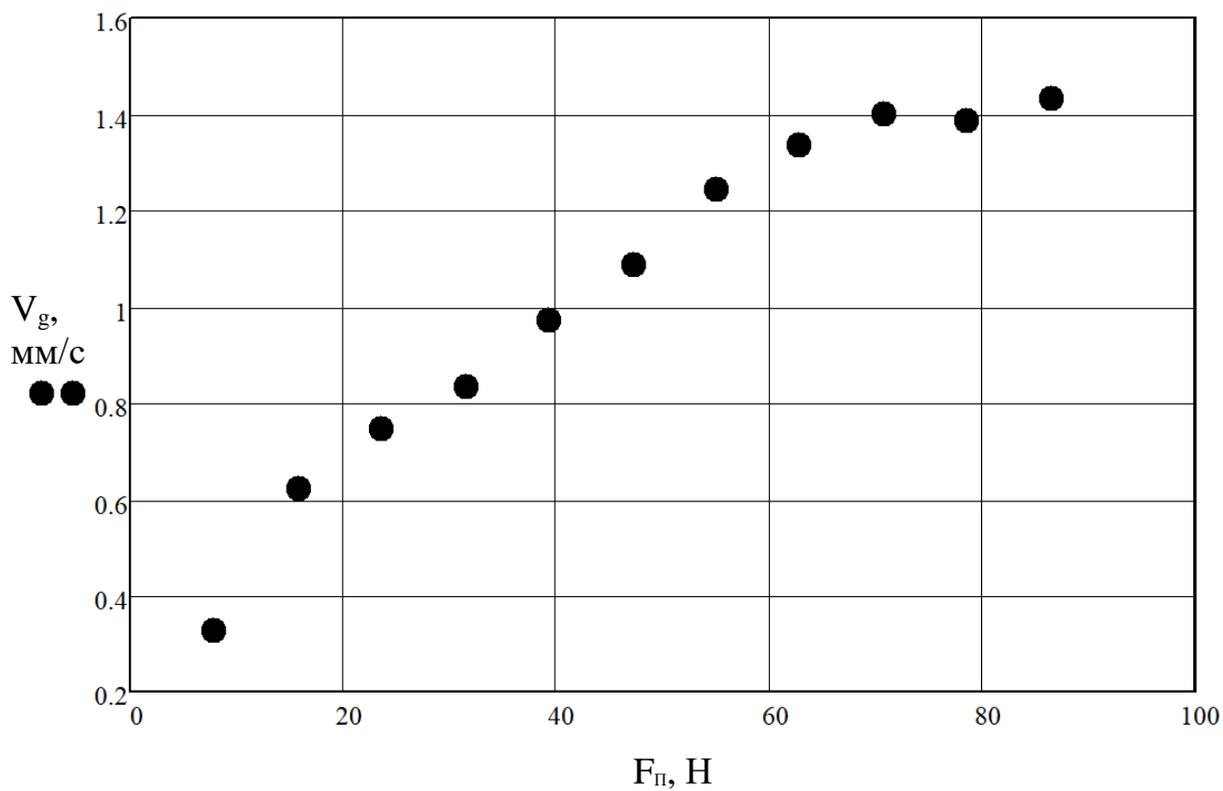


Рисунок 52 – Диаграмма рассеяния скорости внедрения РЧСИ в материал от усилия прижима ( $V_g(F_{п})$ )

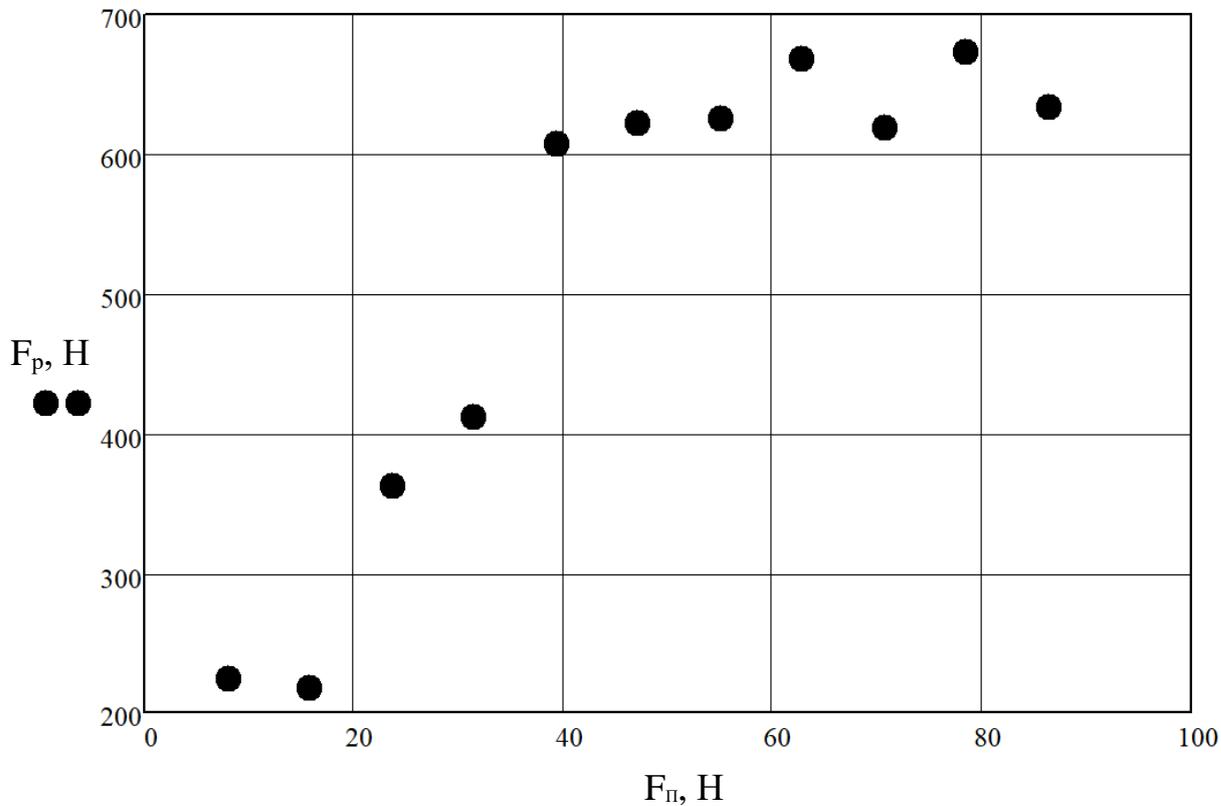


Рисунок 53 – Диаграмма рассеяния усилия разрыва от усилия прижима ( $F_p(F_{п})$ )

Визуализация величин на диаграмме рассеяния демонстрирует выраженную тенденцию к взаимной зависимости, проявляющуюся в закономерном распределении точек. Для определения силы взаимодействия между массивом данных обратимся к индексу корреляции Пирсона ( $r$ ), далее ИИП.

ИИП определяется по формуле (21):

$$r_{xy} = \frac{\sum(X - \bar{X}) \cdot (Y - \bar{Y})}{\sqrt{(X - \bar{X})^2 \cdot (Y - \bar{Y})^2}}. \quad (21)$$

Диапазон значений ИИП находится в интервале  $[-1;1]$ , при этом его абсолютная величина не должна превышать единицу. Данный показатель строго ориентирован на анализ линейных зависимостей, однако в нелинейных моделях его применение допустимо лишь в ограниченных сценариях. К таким случаям относится, например, количественная оценка информационных потерь при аппроксимации нелинейных зависимостей линейными аналогами, а также сравнительный анализ интерпретационных различий между моделями с линейной и нелинейной структурой связи.

Рассчитаем ИИП для каждой диаграммы рассеяния с использованием Mathcad (22):

$$r_{xy} = \text{corr}(X_i, Y_i); \quad (22)$$

$$r_1 = \text{corr}(F_{\text{п}}, t_{\text{ул}}) = 0,797;$$

$$r_2 = \text{corr}(p_{\text{т}}, V_g) = 0,97;$$

$$r_3 = \text{corr}(F_{\text{р}}, p_{\text{т}}) = 0,882;$$

где  $X_i$  – массив данных оси абсцисс,  $Y_i$  – массив данных оси ординат.

Приближение ИИП к границам диапазона ( $\pm 1$ ) отражает максимальную интенсивность статистической связи, напротив, минимальные значения коэффициента (близкие к нулю или равные ему) свидетельствуют о слабой

выраженности линейной ассоциации либо её практическом отсутствии. Если величина принимает отрицательное значение, это указывает на обратную линейную зависимость. Согласно шкале Чеддока (таблица 18), ИК  $r_1$ ,  $r_3$  имеют высокую тесноту связи, в то время как  $r_2$  – весьма высокую.

Таблица 18 – Шкала Чеддока [26]

Индекс корреляции Пирсона, $r_{xy}$	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

Значимость ИИП проверяется с помощью  $t$  – критерия Стьюдента [24] по формуле (23):

$$t_r = \frac{r_{xy} \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}}; \quad (23)$$

$$t_{r_1} = \frac{0,797 \cdot \sqrt{11-2}}{\sqrt{1-0,797^2}} = 3,96;$$

$$t_{r_2} = \frac{0,97 \cdot \sqrt{11-2}}{\sqrt{1-0,97^2}} = 11,89$$

$$t_{r_3} = \frac{0,882 \cdot \sqrt{11-2}}{\sqrt{1-0,882^2}} = 5,63;$$

Сравним расчетное значение  $t$  – критерия с табличным. Должно выполняться условие (24), при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $11 - 2 = 9$ , табличное значение –  $t_{кр} = 2,26$ .

$$t_r > t_{кр} \quad (24)$$

$$3,96 > 2,26$$

$$11,89 > 2,26$$

$$5,63 > 2,26$$

Можно сделать вывод, о том, что наши ИИП статистически значимые.

Далее определим индекс детерминации ( $R^2$ ) по формуле (25), который количественно (в %) оценивает долю дисперсии зависимой переменной, объясняемую регрессионной моделью относительно её общего разброса.

$$R^2 = r_{xy}^2; \quad (25)$$

$$R_1^2 = 0,797^2 = 0,635$$

$$R_2^2 = 0,97^2 = 0,94$$

$$R_3^2 = 0,882^2 = 0,779$$

По результатам расчета, можно судить о том, что:

1) Установлена сильная положительная линейная зависимость между усилием прижима образцов ( $F_{п}$ ) и временем работы ультразвука ( $t_{ul}$ ). Коэффициент детерминации  $R_1^2 = 0,635$  указывает, что примерно 63,5% вариации времени ультразвукового воздействия объясняется изменением усилия прижима.

2) Обнаружена очень сильная положительная линейная связь между усилием прижима ( $F_{п}$ ) и скоростью внедрения торца насадки ( $V_g$ ). Коэффициент детерминации  $R_2^2 = 0,94$  свидетельствует, что около 94% изменчивости скорости внедрения обусловлено вариациями давления.

3) Наблюдается высокая степень положительной линейной зависимости усилия прижима ( $F_{п}$ ) от усилия разрыва образцов ( $F_p$ ). Коэффициент детерминации  $R_3^2 = 0,779$  показывает, что давление объясняет порядка 77,9% вариаций усилия разрыва.

Для оценки значимости уравнения (26) в целом применяется F-критерий Фишера [24]:

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{n - m - 1}{m}; \quad (26)$$

где  $n$  – количество наблюдений,  $m$  – число параметров при переменной  $X$ .

$$F_1 = \frac{0,635}{1 - 0,635} \cdot \frac{11 - 1 - 1}{1} = 16,67;$$
$$F_2 = \frac{0,94}{1 - 0,94} \cdot \frac{11 - 1 - 1}{1} = 141,37;$$
$$F_3 = \frac{0,779}{1 - 0,779} \cdot \frac{11 - 1 - 1}{1} = 31,68;$$

Определим табличное значение  $F$ -критерий Фишера, при заданном уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , числе степеней свободы:  $k_2 = n - m - 1$  (для остаточной суммы квадратов) и  $k_1 = m$  (для факторной суммы квадратов) [24].

Сравним расчетное значение  $F$ -критерий Фишера с табличным ( $F_{кр} = 4,46$ ), должно выполняться следующее условие (27):

$$F_i > F_{кр} \quad (27)$$

$$F_1 = 16,67 > 4,46$$
$$F_2 = 141,37 > 4,46$$
$$F_3 = 31,68 > 4,46$$

Статистически подтверждено, что между изучаемыми параметрами существует прямая линейная связь. Значение индекса детерминации показывает, что модель объясняет большую часть изменчивости данных, что указывает на сильную зависимость переменных, близкую к прямой пропорциональности.

#### **6.4.2 Регрессионный анализ результатов**

В рамках статистического анализа актуальной задачей является не только количественная оценка корреляционных взаимосвязей между исследуемыми параметрами, но и формализация их структурной обусловленности. Это предполагает переход от констатации наличия связи к её математической параметризации, обеспечивающей строгое описание

зависимостей через аналитические уравнения. Реализация такого подхода позволяет трансформировать эмпирически наблюдаемые соотношения в функциональные модели, пригодные для прогнозирования и верификации гипотез. Регрессионную модель на примере линейной функции можно представить [24], как:

$$y = a + bx + \varepsilon; \quad (28)$$

где  $y$  – статистическая зависимость,  $a$  и  $b$  – коэффициенты линейной функции,  $\varepsilon$  – случайная составляющая, обусловленная множеством неучтенных факторов. В качестве сравниваемых зависимостей будем рассматривать – линейную, экспоненциальную, логарифмическую и логистическую функции.

Расчет коэффициентов осуществляется при помощи Mathcad для следующих функций (29...33):

$$1. \text{ Экспоненциальная} \quad \text{expfit}(V_x, V_y, V_g) = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}; \quad (29)$$

$$2. \text{ Логарифмическая} \quad \text{logfit}(V_x, V_y, V_g) = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}; \quad (30)$$

$$3. \text{ Логистическая} \quad \text{lgfit}(V_x, V_y, V_g) = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}; \quad (31)$$

$$4. \text{ Логарифмическая} \quad \text{lnfit}(V_x, V_y) = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}; \quad (32)$$

$$5. \text{ Линейная} \quad \text{line}(V_x, V_y) = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}; \quad (33)$$

где  $V_x$  – вектор оси X,  $V_y$  – вектор оси Y,  $V_g$  – вектор который содержит начальное приближение для всех коэффициентов,  $a, b, c$  – коэффициенты функций.

Полученные коэффициенты (таблица 19) необходимо подставить в соответствующие функции (34...38), чтобы построить функциональные зависимости.

$$1. \quad f(x) = a \cdot e^{bx} + c; \quad (34)$$

$$2. \quad f(x) = a \cdot \ln(x + b) - c; \quad (35)$$

$$3. \quad f(x) = \frac{a}{1 + b \cdot e^{-cx}}; \quad (36)$$

$$4. \quad f(x) = a \cdot \ln(x) - b; \quad (37)$$

$$5. \quad f(x) = a + b \cdot x. \quad (38)$$

Таблица 19 – Коэффициенты для построения функций

Функция	Зависимость	Коэффициенты		
		a	b	c
29...33	$t_{ul}(F_{\Pi})$	18,287	-0,093	3,122
		-1,705	-7,569	10,007
		2,661	-0,987	0,03
		-3,482	17,372	-
		8,646	-0,085	-
29...33	$V_g(F_{\Pi})$	-1,632	-0,02	1,748
		0,736	13,463	-1,909
		1,499	4,004	0,053
		0,487	-0,742	-
		0,392	0,014	-
29...33	$F_p(F_{\Pi})$	-724,754	-0,034	720,322
		268,294	5,046	-505,537
		665,483	5,84	0,084
		222,454	-296,834	-
		233,082	5,997	-

Ниже представлены регрессионные зависимости (рисунки 54...56), визуализирующие выявленные статистические связи между исследуемыми параметрами. На каждом графике отображена линия тренда, соответствующая уравнениям 29...33.

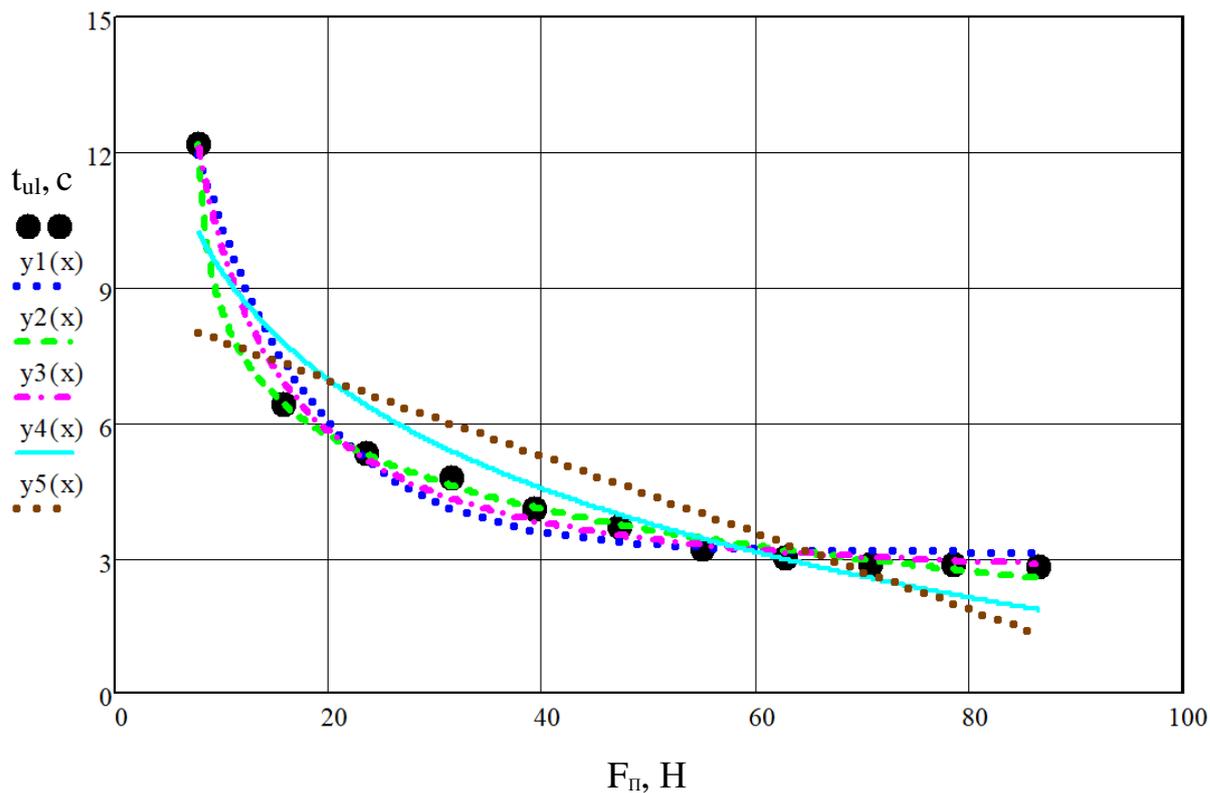


Рисунок 54 – Графики регрессии времени работы ультразвука от усилия прижима ( $t_{ul}(F_{\Pi})$ )

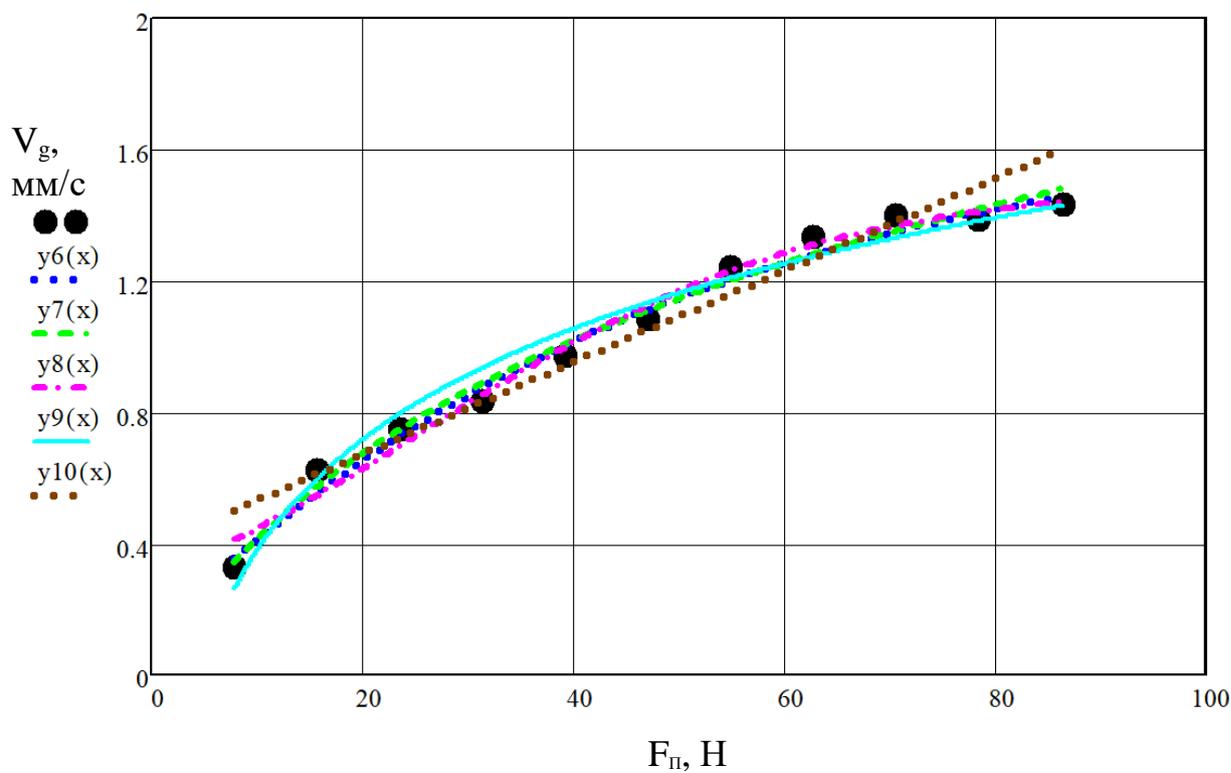


Рисунок 55 – Графики регрессии скорости внедрения РЧСИ в материал от усилия прижима ( $t_{ul}(F_{\Pi})$ )

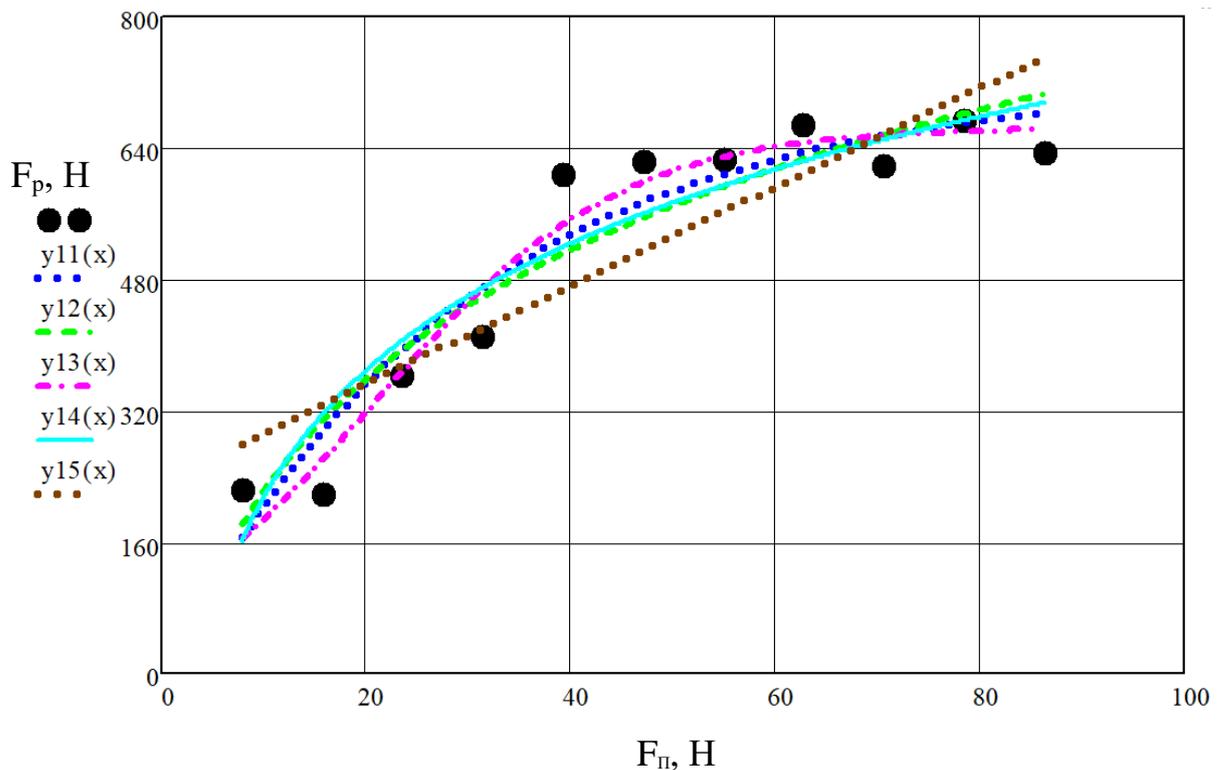


Рисунок 56 – Графики регрессии усилия разрыва от усилия прижима ( $t_{ul}(F_{п})$ )

Ранее были найдены индексы корреляции Пирсона для линейной функции:  $r_1 = 0,797$ ;  $r_2 = 0,97$ ;  $r_3 = 0,882$ . Найдем индексы ИП и детерминации для экспоненциальной, логарифмической и логистической функции по формулам (14) и (17).

Рассчитаем индексы ИП ( $r$ ) и детерминации ( $R^2$ ) для зависимостей  $t_{ul}(F_{п})$ ,  $V_g(F_{п})$  и  $F_p(F_{п})$ . В таблице 20 приведены рассчитанные ИП и ИД

Результаты проведенных расчетов демонстрируют выраженную нелинейную зависимость между исследуемыми параметрами. Анализ аппроксимации данных указывает, что выявленные зависимости наиболее точно описывается экспоненциальной, логарифмической, прямой и логистической функциями, о чем свидетельствуют значения ИП и ИД.

Интерпретация индекса корреляции в рамках шкалы Чеддока подтверждает исключительно высокую тесноту связи для всех рассмотренных зависимостей – значения в диапазоне 0,951–0,997 соответствуют категории «весьма высокая» по данной шкале, что подчеркивает статистическую

значимость выявленных закономерностей. Экспериментальные данные демонстрируют устойчивую воспроизводимость моделей, что позволяет рассматривать их как адекватный инструмент для прогнозирования технологических параметров процесса.

Таблица 20 – Расчетные индексы Пирсона и детерминации

Зависимость	Функция №	ИП	ИД
$t_{ul}(F_{п})$	29...33	0,986	0,972
		0,999	0,997
		0,995	0,991
		0,938	0,880
		0,797	0,635
$V_g(F_{п})$	29...33	0,994	0,988
		0,993	0,986
		0,992	0,985
		0,987	0,974
		0,970	0,940
$F_p(F_{п})$	29...33	0,955	0,912
		0,940	0,884
		0,975	0,951
		0,937	0,879
		0,882	0,779

Полученные значения ИД демонстрируют высокую степень объяснительной способности исследуемых регрессионных моделей. Для зависимости времени работы ультразвука от усилия прижима образцов ( $t_{ul}(F_{п})$ ) величина ИД, равная 99,7%, свидетельствует, что вариации усилия прижима статистически объясняют практически всю наблюдаемую изменчивость длительности ультразвукового воздействия. Аналогично, в случае связи скорости внедрения торца насадки с давлением на границе раздела ( $V_g(F_{п})$ ) ИД достигает 98,8%, что указывает на детерминацию подавляющей части изменчивости скорости внедрения инструмента изменениями давления. Переходя к анализу усилия разрыва образцов ( $F_p(F_{п})$ ), наблюдаем ИД 95,1%, который демонстрирует статистически значимое

влияние вариаций статического давления на границе раздела в зоне сварки на величину разрушающего усилия.

Результаты эмпирического анализа подтверждают статистическую значимость коэффициента детерминации между исследуемыми переменными во всех рассмотренных моделях. Анализ количественных показателей демонстрирует исключительно высокий уровень тесноты статистической взаимосвязи, выраженный значениями, приближающимися к предельным величинам общепринятых оценочных шкал.

Ниже представлены результирующие уравнения полученными в среде Mathcad (диапазон аргумента  $x \in \{7.845, 7.846 \dots 86.399\}$  с шагом 0,001) (рисунки 57...59) наилучшим образом описывающие эксперименты 1 и 2:

$$t_{ul}(F_{\Pi}) = -1,705 \cdot \ln(x - 7,569) + 10,007$$

$$V_g(F_{\Pi}) = -1,632 \cdot e^{-0,02 \cdot x} + 1,748$$

$$F_p(F_{\Pi}) = \frac{665,483}{(1 + 5,84 \cdot e^{-0,084 \cdot x})}$$

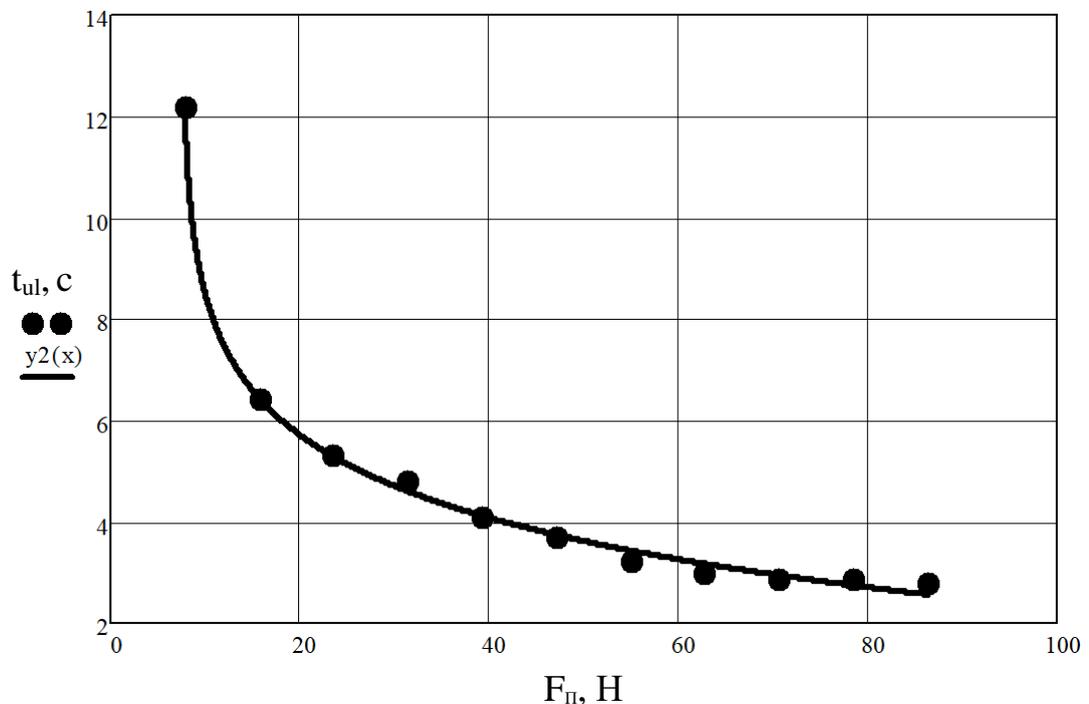


Рисунок 57 – Логарифмическая зависимость ( $t_{ul}(F_{\Pi})$ ) времени работы ультразвука от усилия прижима ( $R^2 = 0,997$ )

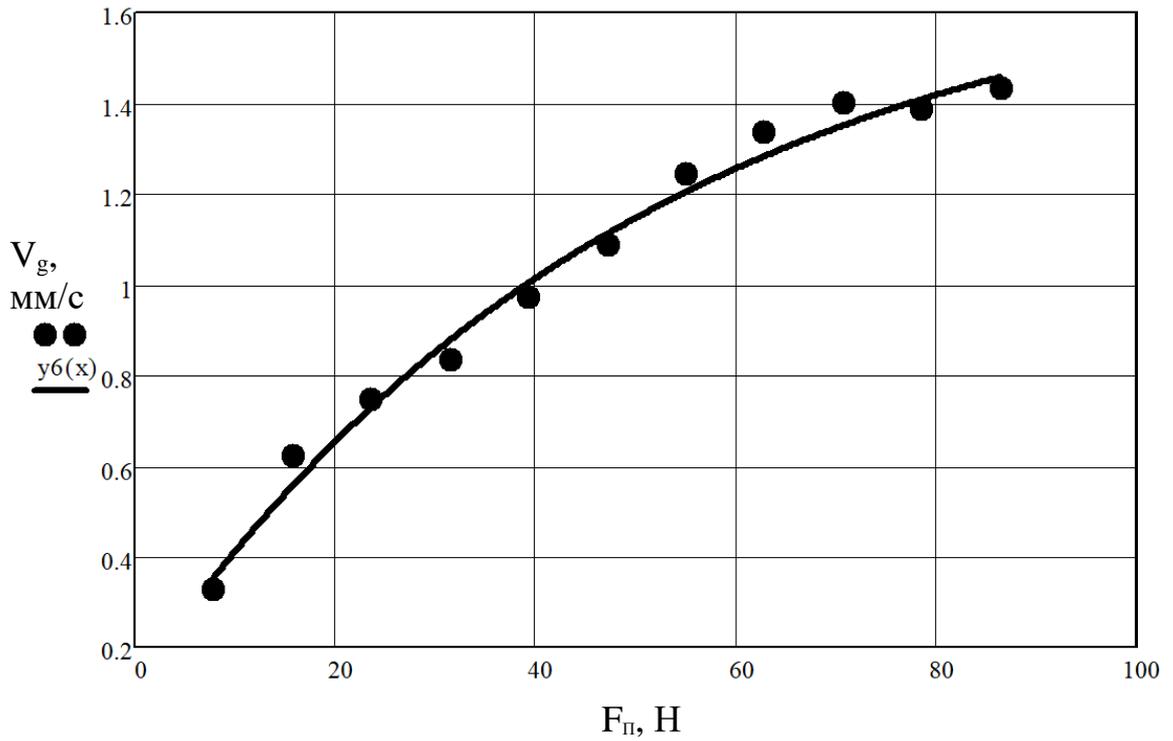


Рисунок 58 – Экспоненциальная зависимость ( $V_g(F_n)$ ) скорости внедрения РЧСИ в материал от усилия прижима ( $R^2 = 0,988$ )

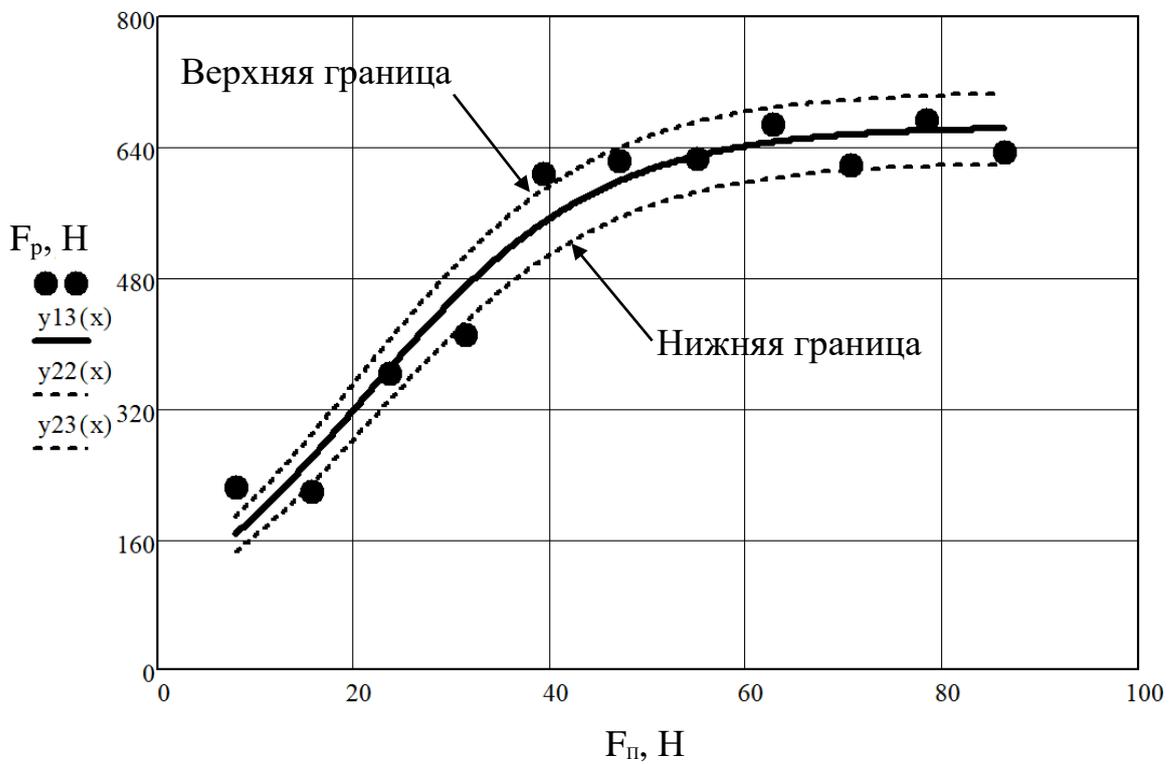


Рисунок 59 – Логистическая зависимость ( $F_p(F_n)$ ) усилия разрыва от усилия прижима ( $R^2 = 0,951$ )

Приведенные аналитические зависимости количественно описывают выявленные динамические и кинетические закономерности процесса ультразвуковой сварки, которые демонстрируют согласованность с экспериментальными данными в пределах доверительных интервалов.

### 6.4.3 Анализ остатков регрессионных моделей

Анализ остатков регрессионных моделей представляет собой фундаментальный этап верификации их адекватности, направленный на выявление необъяснённой вариации данных – той части зависимой переменной, которую модель не смогла уловить. Этот процесс позволяет проверить соблюдение ключевых статистических предпосылок, а также обнаружить аномалии, такие как выбросы или неучтённые нелинейные зависимости.

Остатки ( $e$ ) в контексте регрессионного анализа – это разница между фактическими значениями зависимой переменной и значениями, предсказанными моделью (39):

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i, \quad (39)$$

где  $Y_i$  – фактические значения зависимой переменной,  $\hat{Y}_i$  – предсказанные значения, наиболее точно описывающее регрессионную модель.

Предсказанное значение  $\hat{Y}$  можно рассчитать поочередно, подставляя  $X$  в функцию, в нашем случае – логарифмическая и логистическая функции.

Для линейных регрессий данный анализ наиболее точен, он опирается на предположение о линейной структуре связи между переменными, что обеспечивает однозначную интерпретацию результатов.

В случае нелинейных регрессионных моделей, где сложная функциональная форма может исказить классические предпосылки, акцент

смещается на визуальные методы диагностики для выявления скрытых паттернов и анализа частичных зависимостей.

Ниже в таблице 21 представлены рассчитанные остатки регрессионных моделей для каждой зависимости. На рисунках 60...62 представлены диаграммы рассеяние остатков регрессионных моделей.

Таблица 21 – Остатки регрессионных моделей

$e_1$	$e_2$	$e_3$
-0,002	-0,025	59,118
-0,026	0,068	-41,637
0,047	0,021	-4,929
0,188	-0,042	-57,773
-0,006	-0,03	60,536
-0,059	-0,024	24,14
-0,22	0,042	-3,435
-0,178	0,055	21,885
-0,092	0,054	-35,72
0,138	-0,019	13,314
0,227	-0,024	-27,732

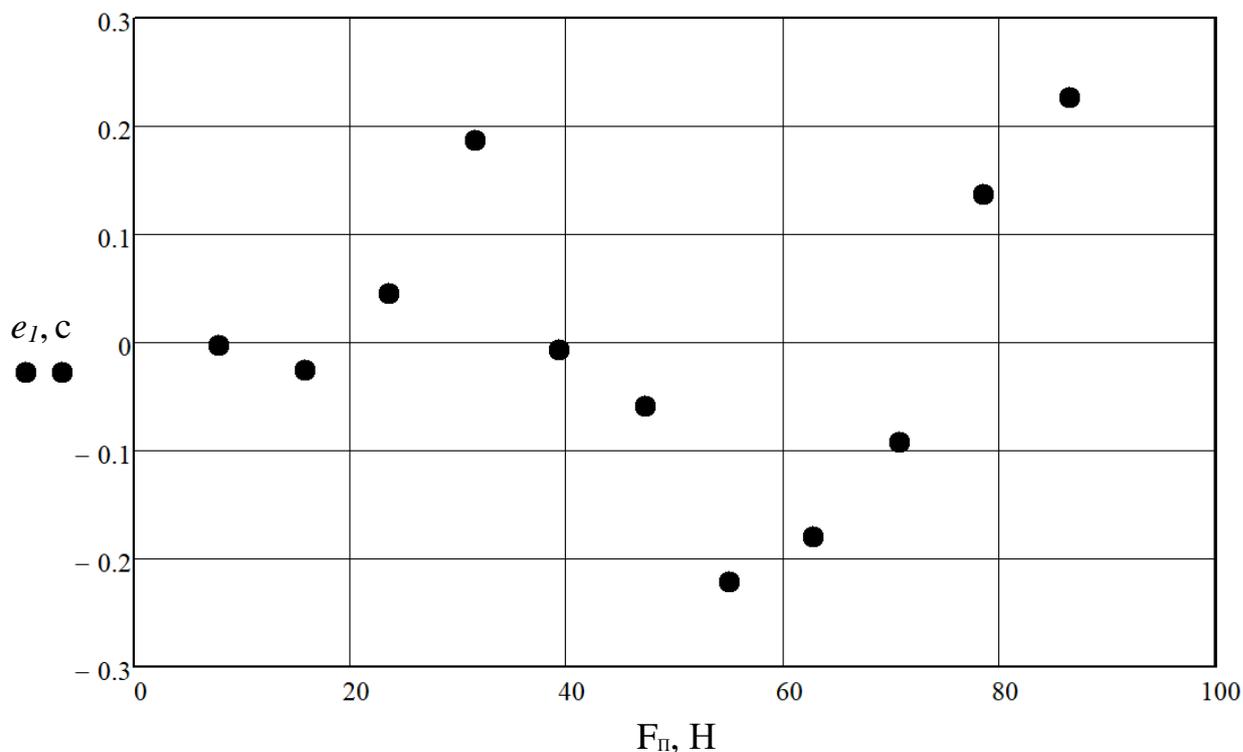


Рисунок 60 – Диаграмма рассеяния остатков регрессионной зависимости времени работы ультразвука от усилия прижима ( $t_{ul}(F_{п})$ )

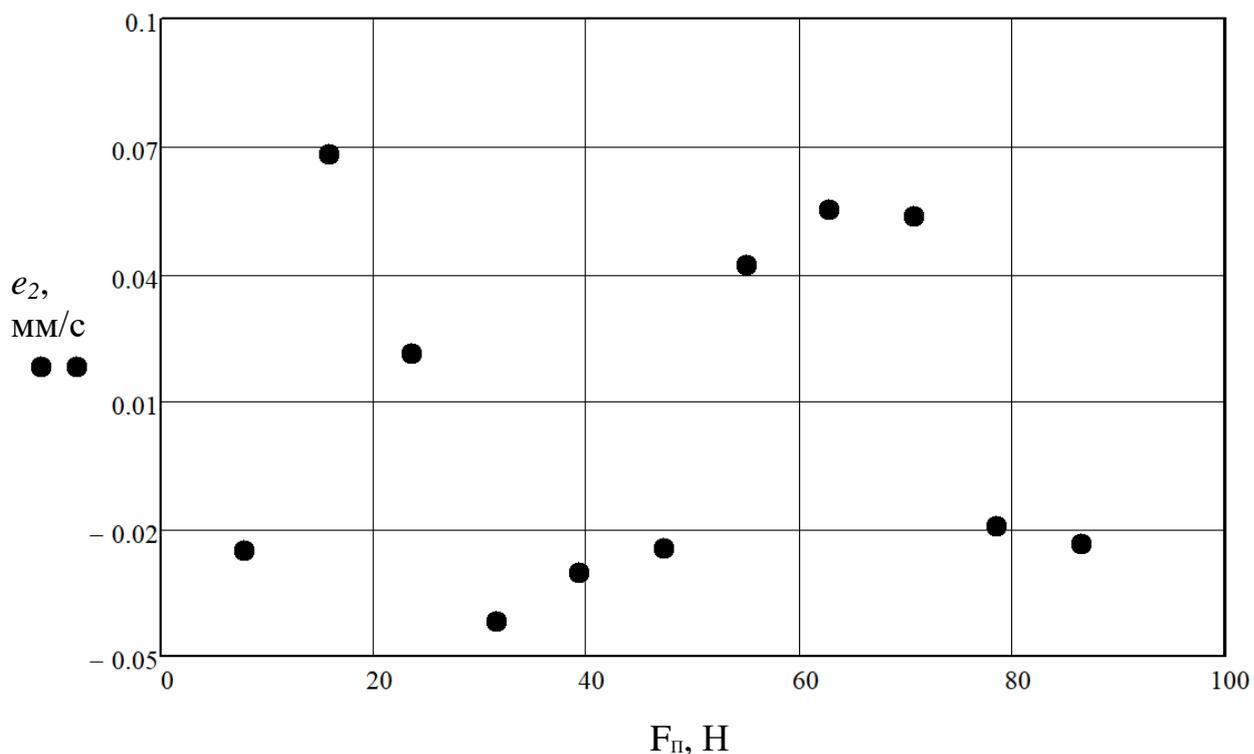


Рисунок 61 – Диаграмма рассеяния остатков регрессионной зависимости скорости внедрения РЧСИ в материал от усилия прижима ( $V_g(F_{\text{п}})$ )

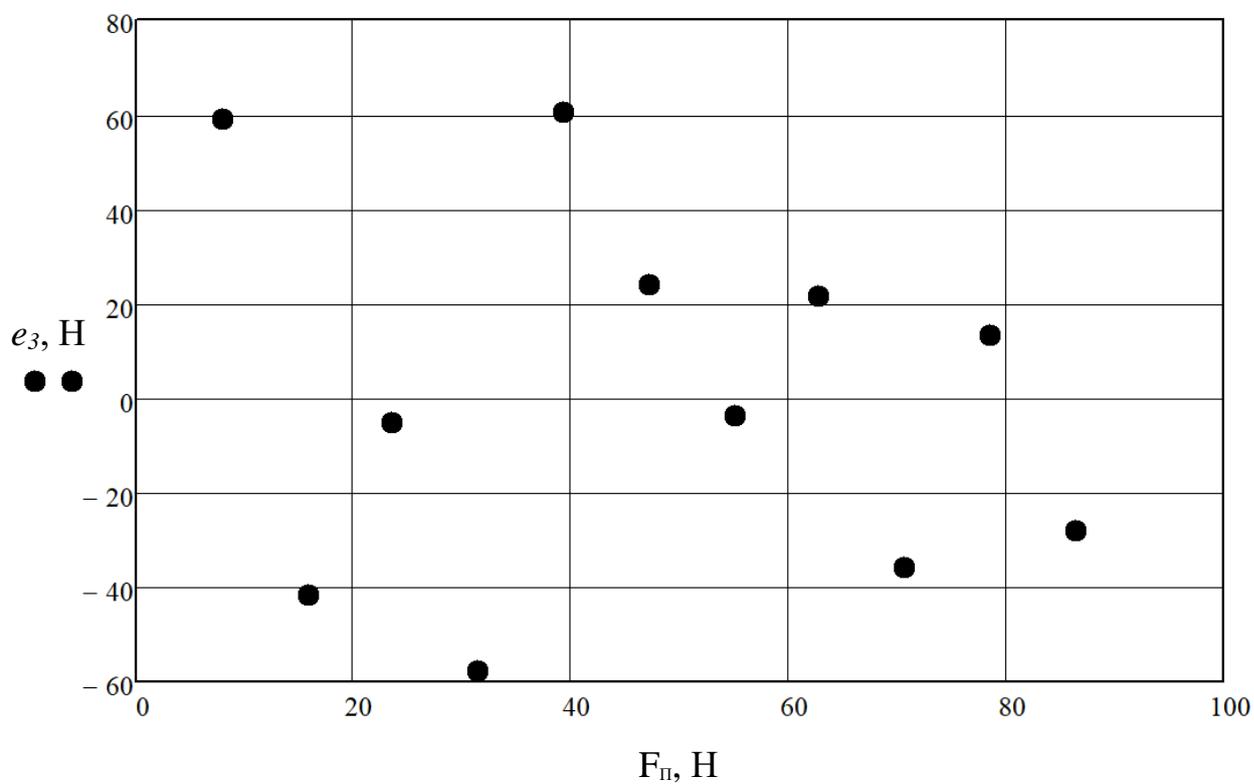


Рисунок 62 – Диаграмма рассеяния остатков регрессионной зависимости усилия разрыва от усилия прижима ( $F_{\text{р}}(F_{\text{п}})$ )

Случайный характер графиков остатков указывает на то, что остатки случайным образом распределяются вдоль горизонтальной оси. Это говорит о том, что регрессионная модель адекватно отражает изменчивость данных:

- 1) Остатки равномерно распределены по горизонтальной оси без заметной тенденции или закономерности.
- 2) Точки на графике остатков распределены случайным образом и не демонстрируют систематического отклонения от оси.
- 3) Отсутствие чёткой закономерности говорит о том, что регрессионная модель хорошо соответствует данным.
- 4) Полученные графики остатков указывает на достоверность регрессионной модели.

#### Выводы

1. Систематизированы экспериментальные данные по 11 группам.
2. Визуализация диаграмм растяжения выявила неоднородность разрушения, связанную с распределением расплава в зоне шва.
3. Проведен анализ данных: исключены аномалии, рассчитаны средние значения, стандартные отклонения и доверительные интервалы.
4. Построены регрессионные модели (экспоненциальная, логарифмическая и логистическая), описывающие их функциональные зависимости с точностью от 95,1 % до 99,7 % по индексу детерминации: Изменения времени работы ультразвука на 99,7 % определяется влиянием усилия прижима. Изменчивость скорости внедрения РЧСИ на 98,6 % объясняется влиянием усилия прижима. Вариация усилия разрыва сварного соединения на 95,1 % объясняется влиянием усилия прижима.
5. Остатки моделей распределены случайно, без систематических отклонений. Это подтверждает адекватность регрессионных моделей и их пригодность для прогнозирования и расчетов значений параметров сварки

## 7 Стабилизация прочности сварных соединений

Обратимся к функции регрессии усилия разрыва от усилия прижима на рисунке 63.

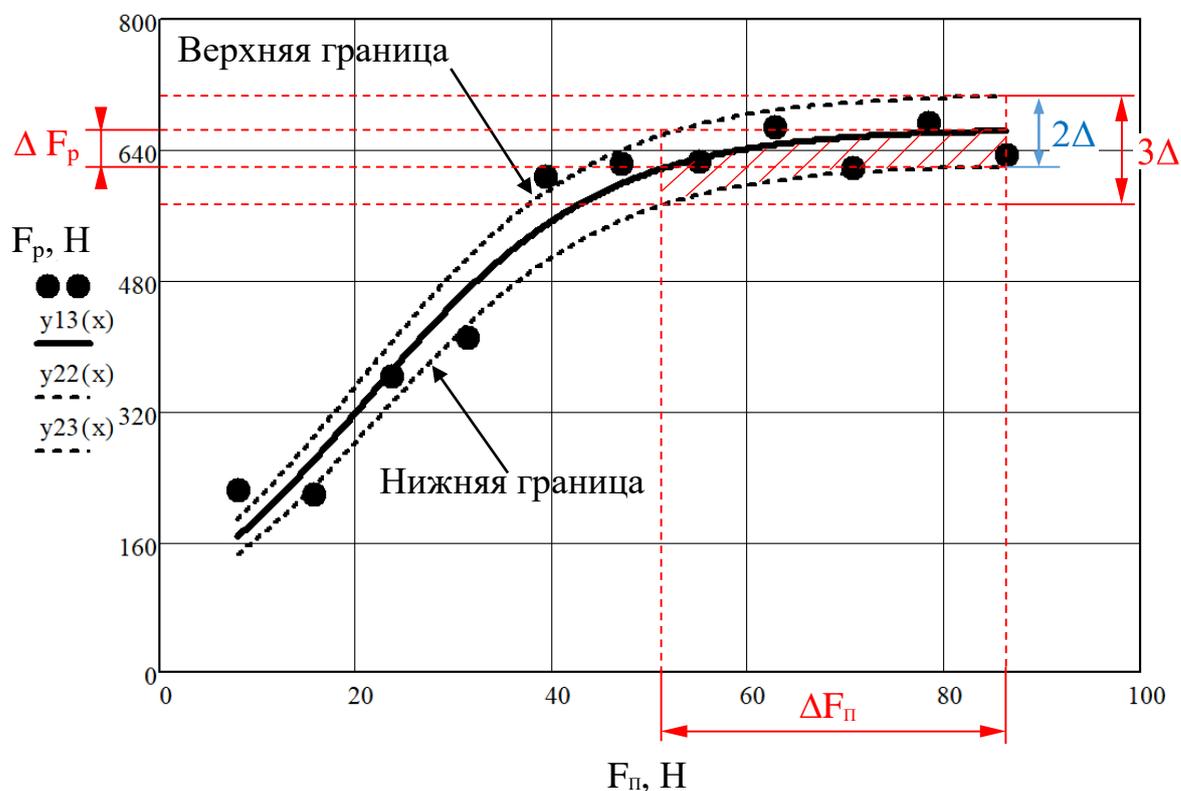


Рисунок 63 – Анализируемая логистическая функция усилия разрыва от усилия прижима ( $F_p(F_п)$ )

Для описания зависимости средних значений усилия разрыва сварного соединения  $F_p$  от силы прижима  $F_п$  установлена адекватная экспериментальным данным функция регрессии логистического типа:

$$F_p(F_п) = \frac{665,483}{(1 + 5,84 \cdot e^{-0,084 \cdot x})}.$$

Анализ модели свидетельствует о нелинейном характере зависимости. При монотонном увеличении  $F_п$  начиная с 50 Н, темп прироста  $F_p$  существенно

снижается. И, начиная приблизительно с  $F_p \geq 580$  Н, кривая асимптотически приближается к предельному (максимальному) значению, что указывает на эффект насыщения прочности соединения.

Для количественной оценки предела насыщения проведём анализ асимптотического поведения функции. Вычисление предела при неограниченном возрастании аргумента подтверждает наличие горизонтальной асимптоты (формула 39):

$$\lim_{F_{\Pi} \rightarrow \infty} F_p(F_{\Pi}) = 665,483. \quad (39)$$

#### Определение диапазонов

Введём следующие параметры для характеристики зоны насыщения:

$\Delta F_p$  — диапазон насыщения усилия разрыва (прочности);

$\Delta F_{\Pi}$  — рациональный диапазон сил прижима: интервал значений  $F_{\Pi}$ , при которых  $F_p$  входит в зону насыщения.

Диапазон насыщения прочности определим, как интервал значений усилий разрыва, в котором (при повышении силы прижима) прирост значений до максимальной прочности осуществляется на величину не более половины доверительного интервала, вычисленного по результатам измерений усилия разрыва.

Для количественной оценки параметров насыщения определим величины  $\Delta F_p$  (диапазон насыщения усилия разрыва) и  $\Delta F_{\Pi}$  (рациональный диапазон сил прижима), а результаты графически представим на рисунке 63.

В качестве меры точности воспроизводимости прочности сварных соединений при максимальной силе прижима (группа 11) используем доверительный интервал  $2\Delta = 62,4$  Н ( $P = 95\%$ ), рассчитанный ранее (таблица 16). Следовательно, результаты прочности можно записать как  $(663 \pm \Delta)$  Н,  $(663 \pm 31,2)$  Н или  $(663 \pm 4,7 \%)$  Н.

## Построение диапазонов на графике

Отложим вниз от максимального значения усилия разрыва, составляющего 663 Н, величину  $\Delta = 31,2$  Н. Из полученной точки проводим горизонтальную линию до пересечения с соответствующей кривой и осью ординат. Точка пересечения данной линии с кривой определяет нижнюю границу диапазона насыщения прочности, одновременно являясь левой границей рационального диапазона сил прижима. Верхняя и правая границы указанных диапазонов соответствуют максимальным значениям усилия  $F_p$  разрыва и силы  $F_{\Pi}$  прижима соответственно; максимальное усилие разрыва достигает 663 Н при силе прижима  $F_{\Pi} = 86,3$  Н.

Графический анализ позволяет установить приближенные диапазоны:  $\Delta F_p = 600 \dots 663$  Н для усилия разрыва и  $\Delta F_{\Pi} = 50 \dots 86,3$  Н для силы прижима.

Интервал  $\Delta F_p$  определен на основе половины доверительного интервала ( $\Delta = 31,2$  Н), рассчитанного по результатам измерений усилия разрыва, что гарантирует нахождение всех истинных значений данного параметра в пределах  $\pm 4,7$  % от номинальной величины, обусловленной значениями из рационального диапазона сил прижима. Наблюдается конвергенция средних значений прочности в диапазоне насыщения к максимальному значению 663 Н по мере роста силы прижима  $F_{\Pi}$ . Данная конвергенция инициируется при достижении величины, равной половине доверительного интервала ( $\Delta = 31,2$  Н), характеризующей точность воспроизводимости прочности сварных соединений на уровне 4,7 %.

## Стабилизация прочности сварных соединений

Используемая рычажная система нагружения, генерирующая усилие прижима, была изготовлена и верифицирована на АО «АВТОВАЗ»; погрешность измерения создаваемого дискретного усилия до 100 Н не превышала  $\pm 1,0$  % от измеряемой величины. Указанная система соответствует

требованиям ГОСТ 28840-90 для машин испытательных группы 1-У, предназначенных для испытаний материалов на растяжение и сжатие.

Практически, сила прижима  $F_{\text{п}}$  представляет собой управляющий параметр, легко воспроизводимый с высокой точностью  $\pm 1,0 \%$ .

С целью оценки стабилизации распределения значений прочности сварных соединений примем за базовый уровень – создание соединений при использовании рационального диапазона  $\Delta F_{\text{п}}$  (от 50 Н до 86,3 Н). В этом случае мы воспроизводим средние значения усилия разрыва из диапазона насыщения прочности от 580 Н до 663 Н, имея при этом разброс значений прочности равный  $3\Delta$  (рисунок 63).

Конечно, если работать только в диапазоне насыщения, мы уже снижаем общий разброс значений прочности и повышаем ресурс работы сварного соединения.

Для дальнейшей стабилизации усилия разрыва, а следовательно, и повышения ресурса работы сварных соединений, можно рекомендовать назначение оптимального значения силы  $F_{\text{п}}$  прижима равного максимальному  $86,3 \pm 1,0 \%$ . Такое назначение гарантирует (с доверительной вероятностью 95%) нахождение истинных значений усилий разрыва в диапазоне  $(663 \pm \Delta)$  Н, соответствующем максимальной прочности сварного соединения. При этом разброс значений прочности равен  $2\Delta$  (рисунок 63).

В результате выполненной стабилизации разброс значений прочности сварных соединений, относительно базового уровня, снижается на 33,3 %.

Это оптимальное значение силы прижима максимизирует не только прочность сварных соединений, но и скорость внедрения РЧСИ (рисунок 58), а, следовательно, и производительность процесса ультразвуковой сварки полипропилена.

## Выводы

1. При  $F_{\Pi} \geq 50$  Н наблюдается зона насыщения прочности, где прирост  $F_p$  статистически незначим.
2. Асимптотический предел  $F_p$  равен 665,483 Н; экспериментально достигнуто 663 Н при  $F_{\Pi} = 86,3$  Н.
3. Выполнена первичная стабилизация – найден диапазон насыщения:  $\Delta F_p = 580 \dots 663$  Н (для усилия разрыва),  $\Delta F_{\Pi} = 50 \dots 86,3$  Н (для усилия прижима). Ширина  $\Delta F_p$  определена половиной доверительного интервала  $\Delta = 31,2\Delta$  ( $P = 95\%$ ).
4. Выполнена вторичная стабилизация – назначение  $F_{\Pi}$  из диапазона  $\Delta F_{\Pi}$  до оптимального максимального значения равного  $86,3 \pm 1,0$  % Н стабилизирует  $F_p$  в пределах  $663 \pm 31,2$  Н с доверительной вероятностью 95%. Разброс значений прочности сварных соединений, относительно базового уровня, снижается на 33,3 %.

## Заключение

Настоящее исследование вносит значительный вклад в развитие методологии анализа механических свойств полимеров, подвергнутых ультразвуковому воздействию, предоставляя новые данные для оптимизации параметров сварки и прогнозирования долговечности соединений в условиях эксплуатационных нагрузок.

В ходе магистерского исследования был выполнен следующий перечень работ:

1. Осуществлен систематический обзор источников:
  - Описаны структурные особенности полимеров, включая их химический состав, типы макромолекул и методы синтеза.
  - Установлены различия между кристаллическими и аморфными полимерами, их влияние на термомеханические свойства и поведение при сварке.
  - Приведены характеристики основных видов пластмасс (ПЭ, ПП, ПВХ, ПА и др.) с указанием их свойств и областей применения.
2. Определены существующие виды и методы сварки пластмасс:
  - Классифицированы методы сварки пластмасс на тепловые, механические и физико-химические, с детализацией их технологических особенностей.
  - Определены преимущества и недостатки каждого метода, включая ограничения по геометрии изделий, типу нагрузок и свойствам материалов.
  - Сформулированы критерии выбора метода сварки, учитывающие эксплуатационные требования и конструктивные параметры соединений.
3. Проанализированы основы ультразвуковой сварки:
  - Описаны принципы ультразвуковой сварки, включая преобразование механических колебаний в тепловую энергию и рекомбинацию макромолекул.

- Выделены ключевые параметры процесса: амплитуда колебаний, статическое давление, время сварки и их влияние на качество соединения.

- Обоснованы преимущества ультразвуковой сварки, такие как высокая скорость, экологичность и сохранение структурной целостности изделий.

4. Рассмотрены методы оценки качества сварных соединений пластмассовых материалов:

- Систематизированы методы неразрушающего контроля (визуальный осмотр, ультразвуковая дефектоскопия) и разрушающего контроля (механические испытания, микроструктурный анализ).

- Установлены ограничения методов НК для выявления внутренних дефектов и необходимость комбинированного подхода с РК.

- Определен стандарт испытаний (ГОСТ 11262-2017) для оценки прочности сварных соединений.

5. Реализован комплекс работ для организации и проведения эксперимента:

- В качестве материала исследования выбран листовой полипропилен марки «Бален» 01030.

- Для создания контактного давления рабочего торца сварочного инструмента на образцы выбран метод рычага в рамках прикладной механики.

- Спроектирована 3D модель технологической оснастки, выполненной в программной среде SolidWorks.

- Производство компонентов оснастки (призмы, рычажного механизма и подвесной системы для дозирования нагрузки) осуществлено с использованием производственных мощностей АО «АВТОВАЗ».

- Изготовлены 220 образцов-заготовок из полипропилена с использованием фрезерного станка 67К25.

- В качестве сварочного инструмента была выбрана насадка с двухступенчатым торцом № 07

– Обоснован выбор диапазона экспериментального нагружения образцов во время ультразвуковой сварки – 7,845...86,295 Н.

– На базе Тольяттинского государственного университета (ТГУ) проведена ультразвуковая сварка 220 образцов изменяя нагрузку с дискретностью 0,2 кг на группу. Создано 110 сварных соединений внахлест.

– Доработано приспособление выполняющее промежуточное звено между креплением образцов и испытательной машиной.

– Выполнены механические испытания сварных соединений на разрывной машине Zwick/Roell Z010 с регистрацией данных в программном комплексе testXpert II.

6. Выполнен статистический анализ экспериментальных данных:

– Систематизированы экспериментальные данные по 11 группам.

– Визуализация диаграмм растяжения выявила неоднородность разрушения, связанную с распределением расплава в зоне шва.

– Проведен анализ данных: исключены промахи (критерий Шовине), рассчитаны средние значения, стандартные отклонения и доверительные интервалы.

– Построены модели описывающие зависимости с точностью от 95,1% до 99,7% по индексу детерминации: Время работы ультразвука на 99,7% коррелирует с усилием прижима. Скорость внедрения насадки на 98,8% определяется усилием прижима. Усилие разрыва на 95,1% связано с усилием прижима.

– Остатки моделей распределены случайно, без систематических отклонений. Это подтверждает адекватность регрессионных моделей и их пригодность для прогнозирования параметров сварки.

Экспериментальные данные подтверждают гипотезу о наличии зависимости между величиной нагрузки, прикладываемой в процессе ультразвуковой сварки полимеров, и прочностью сварного соединения. Установлено, что увеличение механического давления в зоне контакта:

– Повышает степень контакта между свариваемыми поверхностями, минимизируя воздушные зазоры и усиливая трение на молекулярном уровне, что интенсифицирует вязкоупругий нагрев и плавление материала.

– Активирует межмолекулярные взаимодействия за счет принудительного перемешивания расплава, разрушения поверхностных оксидных слоёв и увеличения диффузии макромолекул между соединяемыми слоями.

– Оптимизирует структурную целостность шва, обеспечивая равномерное распределение расплава и подавление дефектов при кристаллизации.

7. Проведен анализ функции зависимости усилия разрыва от усилия прижима на стабилизацию прочности сварных соединений:

– При  $F_{\Pi} \geq 50$  Н наблюдается зона насыщения прочности, где прирост  $F_p$  статистически незначим.

– Асимптотический предел  $F_p$  равен 665,483 Н; экспериментально достигнуто 663 Н при  $F_{\Pi} = 86,3$  Н.

– Выполнена первичная стабилизация – найден диапазон насыщения:  $\Delta F_p = 600 \dots 663$  Н (для усилия разрыва),  $\Delta F_{\Pi} = 50 \dots 86,3$  Н (для усилия прижима). Ширина  $\Delta F_p$  определена половиной доверительного интервала  $\Delta = 31,2\Delta$  ( $P = 95\%$ ).

– Выполнена вторичная стабилизация – назначение  $F_{\Pi}$  из диапазона  $\Delta F_{\Pi}$  до оптимального максимального значения равного  $86,3 \pm 1,0$  % Н стабилизирует  $F_p$  в пределах  $663 \pm 31,2$  Н с доверительной вероятностью 95 %. Разброс значений прочности сварных соединений, относительно базового уровня, снижается на 33,3 %.

Корреляция нагрузки демонстрирует, что усилие прижима выступает критическим фактором, регулирующим как реологические процессы в зоне соединения, так и конечные механические свойства сварного шва.

Выдвинутая гипотеза получила эмпирическое обоснование, а управление прижимным усилием может рассматриваться как ключевой параметр для контроля качества ультразвуковой сварки полимерных изделий.

Установленные в работе зависимости между ключевыми параметрами процесса и свойствами соединения не только углубляют понимание физико – химических механизмов, лежащих в основе формирования шва, но и создают основу для разработки прогностических моделей. Эти модели могут стать инструментом для инженерных расчетов, позволяя предсказывать поведение сварных соединений при различных режимах обработки, оптимизировать технологические параметры и минимизировать риски дефектообразования. Полученные результаты имеют двойную значимость: они расширяют фундаментальные знания в области полимерных материалов и способствуют совершенствованию промышленных технологий ультразвуковой сварки за счет повышения надежности и воспроизводимости соединений.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. ASTM D638-22 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.
2. Billmeyer, F. W. Textbook of polymer science / F. W. Billmeyer. – 3rd ed. – New York: John Wiley & Sons, 1984. – 578 p. – ISBN 0-471-03196-8.
3. Будущее российского автопрома рождается в лабораториях [Электронный ресурс] // Журнал СИБУР. – 2025. – URL: <https://magazine.sibur.ru/publication/direct/transport/budushchee-rossiyskogo-avtoproma-rozhdaetsya-v-laboratoriyakh/> (дата обращения: 21.04.2025).
4. Виды пластмасс [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.autowelding.ru/publ/1/1/plastmassy\\_poluchenie\\_plastmass\\_sostav\\_svoystva\\_svarivaemost/2-1-0-349](https://www.autowelding.ru/publ/1/1/plastmassy_poluchenie_plastmass_sostav_svoystva_svarivaemost/2-1-0-349) (дата обращения: 28.10.2023).
5. Волченко В.Н. Сварка и свариваемые материалы: в 3 т. Т. 1. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с.
6. Волков С.С., Орлов Ю.Н., Черняк Б.Я. Сварка пластмасс ультразвуком. – М.: Химия, 1974. – 264 с.: ил.
7. Волков С. С., Черняк Б. Я. Сварка пластмасс ультразвуком / 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1986. – 256 с.
8. ГОСТ 11262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. – М.: Стандартинформ, 2018. – 21 с.
9. ГОСТ 14359-1969. Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования. – М.: Издательство стандартов, 1993.
10. 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.
11. ГОСТ 25346-2017. Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Общие положения, ряды допусков и основных отклонений. – М.: Стандартинформ, 2018. – 47 с.

12. ГОСТ 9038-90. Приборы измерительные. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 32 с.
13. Дорожкин В. П., Галимова Е. М. Химия и физика полимеров: учебное пособие. – 2-е изд. – Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт, 2013. – 240 с.
14. Ebewele, R. O. Polymer Science and Technology. – Boca Raton: CRC Press, 2000. – 688 p.
15. Еник В.В. Влияние формы рабочего торца инструмента в процессе ультразвуковой сварки пластмасс на прочность сварного соединения: магистерская диссертация / В.В. Еник; науч. рук. А.С. Селиванов, конс. С.В. Мурашкин. – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2024. – 71 с.
16. Grewell D., Benatar A. Welding of Plastics: Fundamentals and New Developments // Intern. Polymer Processing. – 2007. – Vol. XXII. – No 1. – P. 43–60.
17. ISO 527-1:2019 Plastics – Determination of tensile properties – Part 1: General principles. – Geneva: International Organization for Standardization, 2019.
18. Зайцев К. И., Мацюк Л. Н., Богдашевский А. В. и др. Сварка полимерных материалов: Справочник / Под общ. ред. К. И. Зайцева, Л. Н. Мацюк. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.: ил.
19. Завгородний В.К., Калинин Э.Л., Махаринский Е.Г. Оборудование предприятий по переработке пластмасс. – Л.: Химия, 1972. – 464 с.
20. Зуев В. В., Успенская М. В., Олехнович А. О. Физика и химия полимеров: учебное пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 45 с.
21. Козлов Н.А., Митрофанов А.Д. Физика полимеров. – Владимир: ВГУ, 2001. – 345 с.
22. Krevelen, D. W. van Properties of Polymers: Their Correlation with Chemical Structure; Their Numerical Estimation and Prediction from Additive

Group Contributions / D. W. van Krevelen; ed. by K. te Nijenhuis. – 4th ed. – Amsterdam: Elsevier, 2009. – 875 p.

23. Кульневич В. Б. Сварка пластмасс: текст лекций. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 55 с.: ил.

24. Меньщикова В. И. Эконометрика: учебное пособие. – Тамбов: ТГТУ, 2024. – 128 с.

25. Мурашкин С.В., Селиванов А.С., Спиридонов Н.Г., Савина Е.Б. Статистические зависимости влияния времени воздействия ультразвука на прочность и другие параметры сварного соединения полипропилена // Frontier Materials & Technologies. – 2023. – № 1. – С. 57–67.

26. Савина Е.Б. Зависимость прочности ультразвукового сварного соединения пластмасс от времени сварки: магистерская диссертация / науч. рук. к.т.н. С. В. Мурашкин. – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2022. – 86 с.

27. Свойства пластмасс [Электронный ресурс]. – URL: [https://e-plastic.ru/slovar/c/stepen\\_polimerizatskii/](https://e-plastic.ru/slovar/c/stepen_polimerizatskii/) (дата обращения: 09.07.2024).

28. Семенов К.А. Влияние ультразвука на прочность резьбовых соединений: выпускная квалификационная работа (бакалаврская работа) / науч. рук. к.т.н. С. В. Мурашкин. – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2024. – 61 с.

29. Сергеев А.Г. Метрология: Учебник. – М.: Логос, 2004. – 287 с.

30. ТУ 2211-074-05766563-2015. Бален (полипропилен и сополимеры пропилен). Технические условия / ПАО «Уфаоргсинтез». – Уфа, 2015. – 71 с.

31. Тагер А.А. Физикохимия полимеров. – 3-е изд., перераб. – М.: Химия, 1978. – 544 с.

32. Шестопал А. Н., Васильев Ю. С., Минеев Э. А. и др. Справочник по сварке и склеиванию пластмасс / Под общ. ред. А. Н. Шестопала. – К.: Техніка, 1986. – 192 с.: ил.

## Приложение А

### Фото образцов после УЗС и механических испытаний

Рисунок А.1 – Образцы группы 1 после сварки

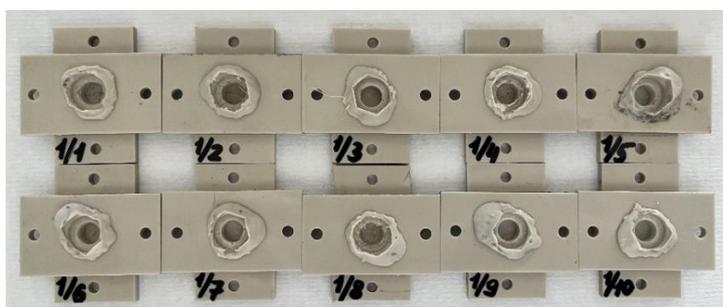


Рисунок А.2 – Образцы группы 2 после сварки



Рисунок А.3 – Образцы группы 3 после сварки



Рисунок А.4 – Образцы группы 4 после сварки



Рисунок А.5 – Образцы группы 5 после сварки



Продолжение Приложения А

Рисунок А.6 – Образцы группы 6 после сварки



Рисунок А.7 – Образцы группы 7 после сварки



Рисунок А.8 – Образцы группы 8 после сварки



Рисунок А.9 – Образцы группы 9 после сварки

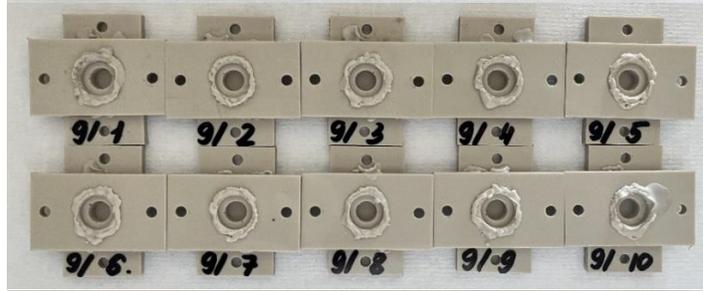


Рисунок А.10 – Образцы группы 10 после сварки



Рисунок А.11 – Образцы группы 11 после сварки



Продолжение Приложения А

Рисунок А.12 – Образцы группы 1 после разрыва



Рисунок А.13 – Образцы группы 2 после разрыва



Рисунок А.14 – Образцы группы 3 после разрыва



Рисунок А.15 – Образцы группы 4 после разрыва



Рисунок А.16 – Образцы группы 5 после разрыва



Рисунок А.17 – Образцы группы 6 после разрыва



Продолжение Приложения А

Рисунок А.18 – Образцы группы 7 после разрыва



Рисунок А.19 – Образцы группы 8 после разрыва



Рисунок А.20 – Образцы группы 9 после разрыва



Рисунок А.21 – Образцы группы 10 после разрыва



Рисунок А.22 – Образцы группы 11 после разрыва



## Приложение Б

### Статистический анализ результатов

Группа 1	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Относительное удлинение, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>	Группа 4	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Относительное удлинение, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
1	11,3	234,0	7,8	19,0	1	4,2	490,0	4,8	
2	10,6	151,0	5,5	23,7	2	4,2	484,0	7,4	69,8
3	11,3	211,0	8,1	25,2	3	4,4	336,0	4,3	
4	11,7	247,0	8,4	18,3	4	4,9		7,8	62,5
5	14,3	229,0	8,6	22,8	5	5,0	362,0	4,8	96,5
6	12,4	145,0	5,6	26,4	6	4,9	463,0	8,5	75,5
7	11,8	243,0	9,5	19,7	7	4,9	397,0	5,2	65,1
8	12,5	234,0	8,8	21,9	8	5,2	308,0	2,9	60,4
9		290,0		23,6	9	4,9	489,0	7,3	78,5
10	13,9	262,0		23,9	10	5,3	374,0	5,4	38,7
Среднее	12,20	224,60	7,79	22,45	Среднее	4,79	411,44	5,84	68,38
СКО	1,23	45,52	1,47	2,69	СКО	0,39	71,20	1,80	16,62
Max	14,30	290,00	9,50	26,43	Max	5,30	490,00	8,50	96,52
Min	10,60	145,00	5,50	18,28	Min	4,20	308,00	2,90	38,73
Размах	3,70	145,00	4,00	8,15	Размах	1,10	182,00	5,60	57,79
Дисперсия	1,50	2072,27	2,16	7,26	Дисперсия	0,15	5069,53	3,25	276,26
Отсчеты N	9	10	8	10	Отсчеты N	10	9	10	8
t критерий	2,31	2,26	2,37	2,26	t критерий	2,26	2,31	2,26	2,26
ССКО	0,41	14,40	0,52	0,85	ССКО	0,12	23,73	0,57	5,88
ΔX	0,94	32,56	1,23	1,93	ΔX	0,28	54,73	1,29	13,29
Верняя граница	13,14	257,16	9,02	24,38	Верняя граница	5,07	466,17	7,13	81,67
Нижняя граница	11,26	192,04	6,56	20,52	Нижняя граница	4,51	356,71	4,55	55,09
Кэфф. Вариации	3,35	6,41	6,67	3,80	Кэфф. Вариации	2,57	5,77	9,76	8,59
Отн. Ошибка	7,72	14,50	15,77	8,59	Отн. Ошибка	5,82	13,30	22,09	19,44

Группа 2	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Относительное удлинение, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>	Группа 5	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Относительное удлинение, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
1	6,1	188,0	7,6	21,9	1	4,6	585,0	8,6	124,4
2	6,4	224,0	9,1	22,7	2	4,2	675,0	13,3	156,5
3	6,6	261,0	10,7		3	4,1	517,0	6,7	96,4
4	7,0	205,0	7,9	19,1	4	3,8	715,0	13,0	151,2
5		225,0	10,7	18,2	5	4,0	601,0	10,1	112,1
6	6,6	259,0	6,6		6	4,0	553,0	8,3	110,1
7	6,0	211,0	10,6	19,5	7	4,1	629,0	11,8	108,0
8	5,8	166,0	9,3	16,9	8	4,0	563,0	8,5	132,4
9	6,5	240,0			9	3,7	581,0	8,6	87,3
10	6,7	201,0	6,2	19,6	10	4,6	657,0	13,1	104,2
Среднее	6,41	218,00	8,74	19,70	Среднее	4,11	607,60	10,20	118,26
СКО	0,38	30,20	1,75	1,99	СКО	0,30	60,93	2,41	22,69
Max	7,00	261,00	10,70	22,66	Max	4,60	715,00	13,30	156,55
Min	5,80	166,00	6,20	16,94	Min	3,70	517,00	6,70	87,26
Размах	1,20	95,00	4,50	5,72	Размах	0,90	198,00	6,60	69,29
Дисперсия	0,14	912,22	3,08	3,96	Дисперсия	0,09	3712,93	5,81	514,92
Отсчеты N	9	10	9	7	Отсчеты N	10	10	10	10
t критерий	2,31	2,26	2,31	2,48	t критерий	2,26	2,26	2,26	2,26
ССКО	0,13	9,55	0,58	0,75	ССКО	0,09	19,27	0,76	7,18
ΔX	0,29	21,60	1,35	1,86	ΔX	0,21	43,59	1,72	16,23
Верняя граница	6,70	239,60	10,09	21,56	Верняя граница	4,32	651,19	11,92	134,49
Нижняя граница	6,12	196,40	7,40	17,83	Нижняя граница	3,90	564,01	8,48	102,03
Кэфф. Вариации	1,97	4,38	6,69	3,82	Кэфф. Вариации	2,28	3,17	7,47	6,07
Отн. Ошибка	4,54	9,91	15,42	9,46	Отн. Ошибка	5,15	7,17	16,91	13,73

Группа 3	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Относительное удлинение, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>	Группа 6	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Относительное удлинение, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
1		324,0	10,3	47,5	1	3,8	681,0	7,1	139,1
2	5,2	361,0	11,4	71,9	2	4,0	692,0	11,6	128,1
3	5,4			97,7	3	3,5	523,0	6,2	107,1
4	5,3			32,5	4	3,4	600,0	8,5	128,2
5	5,2	360,0	11,1	56,7	5	3,5	616,0	11,0	121,1
6	5,5			17,5	6	3,7			
7	5,4	351,0	10,6	46,1	7	3,8	675,0	11,2	131,8
8	5,3	369,0	10,5	72,3	8	3,5	644,0	9,7	112,3
9	5,3	391,0	10,2	91,5	9	3,9	587,0	8,2	122,5
10		385,0	11,0	66,3	10	3,7	585,0	8,6	131,7
Среднее	5,33	363,00	10,73	60,01	Среднее	3,68	622,56	9,12	124,66
СКО	0,10	22,29	0,45	25,11	СКО	0,20	55,44	1,89	10,07
Max	5,50	391,00	11,40	97,75	Max	4,00	692,00	11,60	139,11
Min	5,20	324,00	10,20	17,50	Min	3,40	523,00	6,20	107,13
Размах	0,30	67,00	1,20	80,25	Размах	0,60	169,00	5,40	31,98
Дисперсия	0,01	497,00	0,20	630,33	Дисперсия	0,04	3073,28	3,56	101,36
Отсчеты N	8	7	7	10	Отсчеты N	10	9	9	9
t критерий	2,37	2,48	2,48	2,26	t критерий	2,26	2,31	2,31	2,31
ССКО	0,04	8,43	0,17	7,94	ССКО	0,06	18,48	0,63	3,36
ΔX	0,09	20,87	0,42	17,96	ΔX	0,14	42,61	1,45	7,74
Верняя граница	5,41	383,87	11,15	77,97	Верняя граница	3,82	665,17	10,57	132,40
Нижняя граница	5,24	342,13	10,31	42,05	Нижняя граница	3,54	579,94	7,67	116,92
Кэфф. Вариации	0,69	2,32	1,57	13,23	Кэфф. Вариации	1,71	2,97	6,89	2,69
Отн. Ошибка	1,63	5,75	3,89	29,93	Отн. Ошибка	3,87	6,84	15,89	6,21

Рисунок Б.1 – Статистическая обработка результатов 1...6 групп

## Продолжение Приложения Б

Группа 7					Группа 10				
Группа 7	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Относительное удлинение, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>	Группа 10	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Относительное удлинение, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
1	3,6	589,0	8,4	159,3	1	3,0	729,0	11,4	207,1
2		598,0	7,0	166,5	2	2,9	782,0	12,1	209,2
3	3,6	555,0	6,7	163,1	3	2,8	705,0	8,3	200,4
4	3,7	731,0		203,6	4	2,9	666,0	6,3	221,4
5	2,9	645,0	10,0	220,0	5	2,9	559,0	7,2	181,5
6	3,3	583,0	5,3		6		585,0	5,2	192,4
7	3,1	594,0	7,4	139,2	7		585,0	5,7	
8	2,9	691,0	11,9	156,0	8	2,8	703,0	10,3	199,1
9	2,9	617,0	9,6	127,5	9	2,8	688,0	9,3	193,8
10	2,9	653,0	7,4	140,0	10	2,9	733,0	10,3	193,0
Среднее	3,21	625,60	8,19	163,92	Среднее	2,88	673,50	8,61	199,77
СКО	0,34	54,25	2,01	30,23	СКО	0,07	74,01	2,44	11,62
Max	3,70	731,00	11,90	219,98	Max	3,00	782,00	12,10	221,40
Min	2,90	555,00	5,30	127,47	Min	2,80	559,00	5,20	181,52
Размах	0,80	176,00	6,60	92,51	Размах	0,20	223,00	6,90	39,88
Дисперсия	0,12	2942,93	4,04	914,05	Дисперсия	0,00	5477,39	5,96	135,01
Отсчеты N	9	10	9	9	Отсчеты N	8	10	10	9
t критерий	2,31	2,26	2,31	2,31	t критерий	2,37	2,26	2,26	2,31
ССКО	0,11	17,15	0,67	10,08	ССКО	0,02	23,40	0,77	3,87
ΔX	0,26	38,80	1,54	23,24	ΔX	0,06	52,94	1,75	8,93
Верняя граница	3,48	664,40	9,73	187,16	Верняя граница	2,93	726,44	10,36	208,70
Нижняя граница	2,95	586,80	6,64	140,68	Нижняя граница	2,82	620,56	6,86	190,83
Коэфф. Вариации	3,58	2,74	8,18	6,15	Коэфф. Вариации	0,87	3,47	8,97	1,94
Отн. Ошибка	8,24	6,20	18,86	14,18	Отн. Ошибка	2,06	7,86	20,29	4,47

Группа 8					Группа 11				
Группа 8	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Относительное удлинение, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>	Группа 11	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Относительное удлинение, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
1	3,1	654,0	10,0	213,7	1	2,7	620,0	7,4	171,4
2	3,0	639,0	9,8	124,5	2	2,9	613,0	6,1	
3	3,0	667,0	10,0	210,2	3	2,7	690,0	11,3	173,0
4	3,1	603,0	8,6	153,5	4	2,7	573,0	7,3	166,9
5	2,8	751,0		231,5	5	3,0	670,0	12,0	151,9
6	3,2	709,0	8,4	226,6	6	2,8	630,0	5,8	184,2
7	2,7	734,0	12,7	210,0	7	2,9	662,0	7,8	153,0
8	3,0	541,0	8,0	171,3	8	2,8		6,9	119,3
9	2,9	615,0	5,8	160,5	9	2,7		11,4	172,8
10	3,1	767,0	13,2	171,2	10	2,7	622,0	7,8	138,0
Среднее	2,99	668,00	9,61	187,30	Среднее	2,79	635,00	8,38	158,95
СКО	0,15	72,21	2,30	35,81	СКО	0,11	37,28	2,30	20,44
Max	3,20	767,00	13,20	231,48	Max	3,00	690,00	12,00	184,20
Min	2,70	541,00	5,80	124,54	Min	2,70	573,00	5,80	119,27
Размах	0,50	226,00	7,40	106,93	Размах	0,30	117,00	6,20	64,93
Дисперсия	0,02	5214,22	5,30	1282,43	Дисперсия	0,01	1389,43	5,29	417,93
Отсчеты N	10	10	9	10	Отсчеты N	10	8	10	9
t критерий	2,26	2,26	2,31	2,26	t критерий	2,26	2,37	2,26	2,31
ССКО	0,05	22,83	0,77	11,32	ССКО	0,03	13,18	0,73	6,81
ΔX	0,11	51,65	1,77	25,62	ΔX	0,08	31,17	1,64	15,71
Верняя граница	3,10	719,65	11,38	212,91	Верняя граница	2,87	666,17	10,02	174,66
Нижняя граница	2,88	616,35	7,84	161,68	Нижняя граница	2,71	603,83	6,74	143,24
Коэфф. Вариации	1,61	3,42	7,98	6,05	Коэфф. Вариации	1,25	2,08	8,68	4,29
Отн. Ошибка	3,65	7,73	18,41	13,68	Отн. Ошибка	2,82	4,91	19,63	9,89

Группа 9				
Группа 9	Время сварки, с	Усилие отрыва, Н	Относительное удлинение, %	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
1	3,1	543,0	7,7	178,1
2	2,7	616,0		246,7
3	2,9	691,0	9,5	176,0
4	2,8	565,0	7,3	210,5
5	2,6	625,0	9,1	207,5
6	2,9	664,0	7,2	203,9
7	2,9	615,0	8,5	235,1
8	2,7	676,0	8,2	169,6
9	3,1	639,0	8,6	208,6
10	2,8	562,0	8,7	157,0
Среднее	2,85	619,60	8,31	199,31
СКО	0,16	50,39	0,79	28,84
Max	3,10	691,00	9,50	246,68
Min	2,60	543,00	7,20	157,05
Размах	0,50	148,00	2,30	89,63
Дисперсия	0,03	2539,60	0,62	831,85
Отсчеты N	10	10	9	10
t критерий	2,26	2,26	2,31	2,26
ССКО	0,05	15,94	0,26	9,12
ΔX	0,12	36,05	0,60	20,63
Верняя граница	2,97	655,65	8,92	219,94
Нижняя граница	2,73	583,55	7,71	178,68
Коэфф. Вариации	1,83	2,57	3,15	4,58
Отн. Ошибка	4,14	5,82	7,27	10,35

Отброс промахов №1

Отброс промахов №2

Относительная ошибка не превышает 15% согласно Меньшиковой

Относительная ошибка превышает 15%

Рисунок Б.2 – Статистическая обработка результатов 7...11 групп