

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа – Инженерная школа новых производственных технологий  
Направление подготовки – 15.04.01 Машиностроение  
Отделение школы (НОЦ) – Материаловедения

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Влияние параметров процесса сварки трением с перемешиванием на качество сварных соединений сплава Д16Т</b>

УДК 669.018.063.9:621.791.14.052

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ61	Сулеймен Гулжайна Бериккызы		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Колубаев Е.А.	д.т.н.		

Со-руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Младший научный сотрудник ИФПМ СО РАН	Иванов А.Н.			

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Старикова Е.В.	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Раденков Т.А.			

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
15.04.01	Коростелева Е.Н.	к.т.н., доцент		

Томск – 2018 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

### 15.04.01 «Машиностроение»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
P1	Применять глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания для создания и обработки новых материалов
P2	Применять глубокие знания в области современных технологий машиностроительного производства для решения междисциплинарных инженерных задач
P3	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа, связанные с созданием и обработкой материалов и изделий, с использованием системного анализа и моделирования объектов и процессов машиностроения
P4	Проводить теоретические и экспериментальные исследования с анализом их результатов в области современных технологий обработки материалов
P5	Разрабатывать мероприятия по комплексному использованию сырья, по замене дефицитных материалов и изысканию способов утилизации отходов машиностроительного производства
P6	Оценивать технико-экономическую эффективность проектирования, исследования, изготовления машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов
Универсальные компетенции	
P7	Использовать глубокие знания по проектному менеджменту для ведения инновационной инженерной деятельности с учетом юридических аспектов защиты интеллектуальной собственности
P8	Применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, разрабатывать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности
P10	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена группы, состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации
P11	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа – Инженерная школа новых производственных технологий  
Направление подготовки – 15.04.01 Машиностроение  
Отделение школы (НОЦ) – Материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

\_\_\_\_\_ Е.Н. Коростелева

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
4АМ61	Сулеймен Гулжайне Бериккызы

Тема работы:

Влияние параметров процесса сварки трением с перемешиванием на качество сварных соединений сплава Д16Т
--

Утверждена приказом директора (дата, номер)	
---	--

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Объектом исследования является технологический процесс СТП сплава Д16Т.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Изучение литературных источников с целью выяснения достижений мировой науки в области применения технологического процесса СТП; актуальность работы и постановка задачи; методы получения и исследования объекта исследования; анализ результатов выполненной работы; заключение.
<b>Перечень графического материала</b>	Презентация в Microsoft PowerPoint
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Старикова Е.В.
Социальная ответственность	Раденков Т.А.
Разделы, выполненные на иностранном языке	Демьяненко Н.В.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Основная часть, Литературный обзор, Результаты исследования, Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», Социальная ответственность – русский язык	
<b>На иностранном языке выполнены следующие разделы диссертации:</b>	
Литературный обзор	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Колубаев Е.А.	д.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ61	Сулеймен Г.Б.		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 106 с., 27 рис., 17 табл., 29 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: сварка, сварной шов, сварка трением с перемешиванием, сплав Д16Т, режим сварки, структура и механические свойства сварного шва

Объектом исследования является технологический процесс сварки трением с перемешиванием сплава Д16Т.

Цель работы – исследование влияния параметров процесса сварки трением с перемешиванием на качество сварных соединений материала Д16Т.

В данной научной работе проводились исследования структуры и механических свойств полученного сварного шва. Для исследования структуры были сделаны снимки с помощью металлографического микроскопа. Для исследования механических свойств провели испытание на растяжение.

В результате исследования установлено, что

- при сварке трением с перемешиванием происходит снижение прочностных характеристик, однако с ростом скорости вращения инструмента разупрочняющее влияние снижается;
- с ростом скорости вращения инструмента характер разрушения сварного соединения изменяется в сторону вязкого разрушения;
- низкие скорости вращения инструмента не обеспечивают разогрев материала, достаточный для получения требуемой температуры и условий перемешивания материала;
- низкие скорости вращения инструмента не обеспечивают разогрев материала, достаточный для рекристаллизации материала и роста зерна, что ухудшает свойства сварного соединения.

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

ГОСТ Р ИСО 4136-2009	Испытания разрушающие сварных соединений металлических материалов. Испытание на растяжение образцов, вырезанных поперек шва
ИСО 6892-1:2009	Материалы металлические. Испытания на растяжение
ГОСТ 27637-88	Полуфабрикаты из алюминиевых деформируемых термоупрочняемых сплавов. Контроль микроструктуры на пережог металлографическим методом
ГОСТ 6456-82	Шкурка шлифовальная бумажная. Технические условия
ОСТ 134-1051-2010	Сварка фрикционная. Технические требования к сварным соединениям
ГОСТ 21073.3	Металлы цветные. Определение величины зерна методом подсчета пересечений зерен
ГОСТ 25593	Пасты алмазные. Технические условия
ГОСТ 6996-66	Сварные соединения. Методы определения механических свойств

## Оглавление

Введение.....	8
Глава 1. Общие сведения о сварке трением с перемешиванием.....	10
1.1 Понятие о сварке трением с перемешиванием.....	10
1.2 Области применения.....	12
1.3 Основные преимущества и недостатки метода СТП.....	14
1.4 Технологические возможности способа сварки трением с перемешиванием.....	16
1.5 Свариваемые материалы.....	17
1.6 Параметры процесса сварки трением с перемешиванием.....	21
Глава 2. Методика исследований.....	30
2.1 Исследуемый материал.....	30
2.2 Подготовка образцов.....	32
2.3 Исследования механических характеристик сварных соединений.....	35
2.4 Исследования структурных характеристик сварных соединений.....	39
Глава 3. Анализ результатов.....	42
3.1 Результаты исследования механических свойств.....	42
3.2 Результаты исследования структурных характеристик.....	47
4.«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	52
5.«Социальная ответственность».....	73
Заключение.....	85
Список литературы.....	86
Приложение А.....	89

## **Введение**

Неразъемные соединения при изготовлении конструкций из алюминиевых сплавов можно получить различными способами сварки. Но, в большинстве случаев формирование сварочного шва происходит за счет расплавления некоторого объема свариваемого металла и подающейся в зону сварки проволоки с последующей их кристаллизацией в инертной защитной среде. Нагрев металла до температуры плавления приводит к значительным фазовым и структурным изменениям, вызывает значительную пластическую деформацию соединений и способствует возникновению в них больших остаточных напряжений. В зоне сварки основной металл разупрочняется, а шов имеет литую крупнокристаллическую структуру, что приводит к резкому снижению прочностных свойств сварного соединения [1]. Следовательно, если осуществлять процесс сварки без разогрева металла до температуры плавления, можно избежать многих перечисленных выше недостатков [2].

С этой точки зрения, особый интерес для получения неразъемных соединений представляет способ сварки трением с перемешиванием, который реализуется в твердой фазе без расплавления металла. Принцип образования сварного соединения основан на нагреве небольшого объема металла до пластического состояния за счет трения, перемешивания его по всей толщине свариваемых кромок и деформирования в замкнутом пространстве [2]. При этом температурное воздействие является определяющим фактором формирования микроструктуры материала. Поэтому для каждого материала необходим подбор параметров сварочного процесса, а именно соотношение скоростей вращения и перемещения инструмента. Результаты исследований процесса сварки трением с перемешиванием различных алюминиевых сплавов подтверждают

необходимость подбора режима сварки с учетом особенностей термомеханического поведения каждого из них [3].

Способ сварки трением с перемешиванием позволяет выполнять сварные соединения любой пространственной конфигурации и положения, а также кольцевых стыков, неповоротных труб и т.д. [4]. В настоящее время, степень разработанности способа позволяет получать качественные и воспроизводимые сварные соединения с улучшенными характеристиками материала.

### **Цель работы**

Целью моей научной работы является исследование влияния параметров процесса сварки трением с перемешиванием на качество сварных соединений материала Д16Т.

**Достижение поставленной цели достигается решением следующих задач:**

- 1) оценить влияние технологических параметров режима сварки трением с перемешиванием на качество сварного соединения;
- 2) провести исследование и анализ свойства сварного соединения, полученного методом СТП.

## **Глава 1. Общие сведения о сварке трением с перемешиванием**

### **1.1 Понятие о сварке трением с перемешиванием**

Сварка трением с перемешиванием – это сравнительно новый процесс соединения твердых тел. В особенности, данный метод может быть использован при соединении высокопрочных алюминиевых сплавов и сплавов других металлов, которые трудно поддаются традиционному виду сварки - сварке плавлением. Не так давно процесс СТП был разработан для микроструктурной модификации металлических материалов [5].

СТП рассматривается как значительное открытие в области соединения металлов за десятилетие, ее можно отнести к «зеленым» технологиям в связи с его энергетической эффективностью, экологически безвредностью и универсальностью. По сравнению с традиционным методом сварки СТП потребляет значительно меньше энергии, используется защитный газ или флюс, тем самым обеспечивая экологическую безвредность. Соединение не включает в себя использование присадочного металла, не имеет значения проблема совместимости состава материалов, как в случае сварки плавлением. В отличие от традиционной сварки трением, которая, в основном, выполняется на осесимметричных частях, для образования соединения вращающихся и прижимающихся друг к другу, СТП может применяться для различных типов соединения: стыковое, тавровое, угловое и соединение внахлест.

Сварка трением вращающимся инструментом была изобретена в 1965 г. Способ сварки металлов трением предложен Клименко Ю.В по авторскому свидетельству № 195846 (приоритет от 09.11.65г.) [6]. Однако способ был запатентован в Великобритании в декабре 1991 года в Технологическом институте сварки (TWI) [7].

Основной концепт СТП заключается в следующем. Неплавящийся вращающийся инструмент со специальным стержнем и заплечиком внедряется в состыкованные кромки заготовок и перемещается вдоль линии стыка (рисунок 1). Основные функции инструмента: нагрев и движение материала. Нагрев обусловлен трением между инструментом и заготовкой и пластической деформацией заготовки. Локальный нагрев смягчает материал, находящийся около стержня, а комбинация вращения и перемещения инструмента приводит в движение материал. В зависимости от различных геометрических особенностей инструмента перемещение материала вокруг стержня может быть довольно сложным (рисунок 2).

Во время процесса сварки материал претерпевает температурное воздействие и интенсивную деформацию пластического характера. В результате такого воздействия структура материала изменяется. Появляются мелкие рекристаллизованные зерна, и такая структура обеспечивает хорошие механические свойства сварного соединения [7].

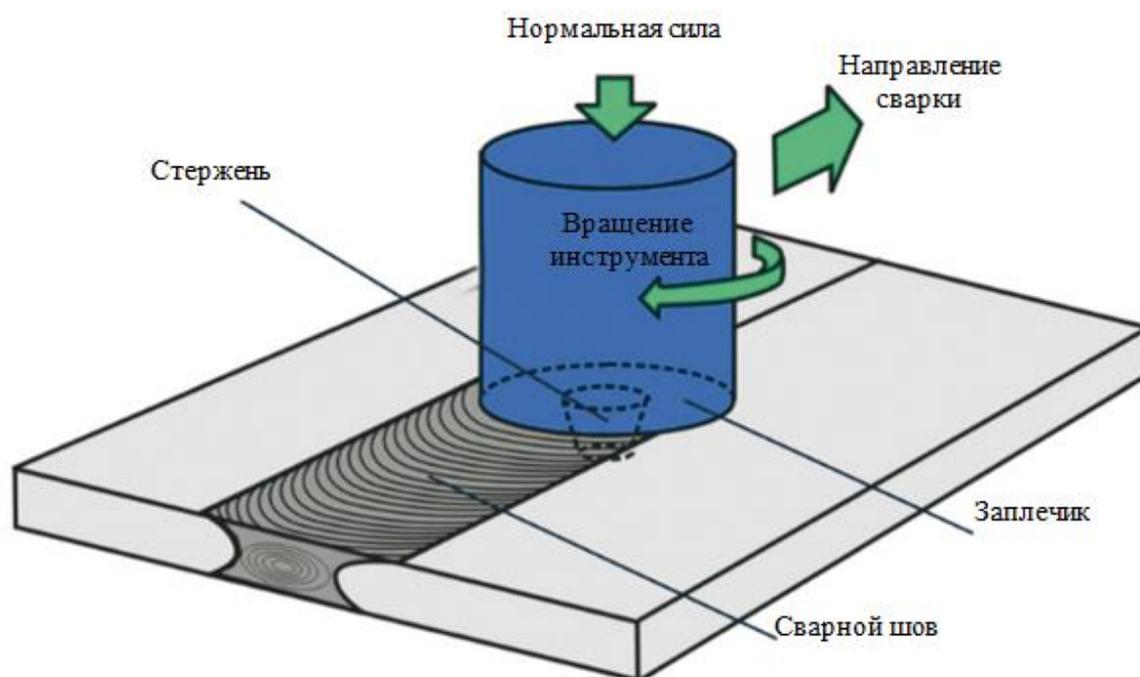


Рисунок 1. Схема процесса сварки трением с перемешиванием [8]

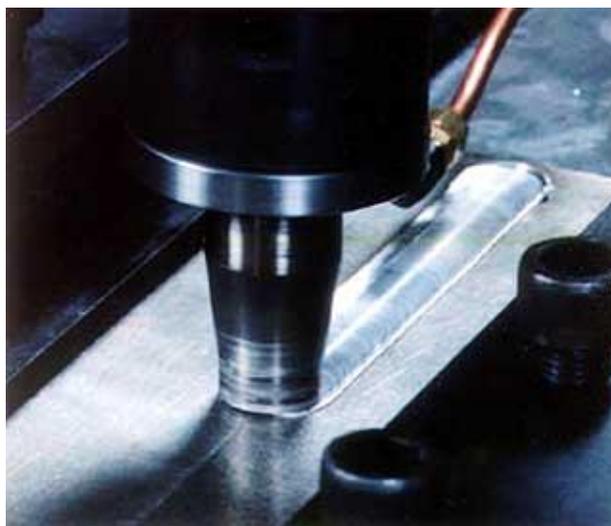


Рисунок 2. Сварка трением с перемешиванием [8]

## 1.2 Области применения

В последние годы процесс сварки трением с перемешиванием применяется в таких ответственных отраслях, как судостроение, вагоностроение, автомобилестроение, ракетно-космическая и авиационная отрасли. Список крупных компаний и организаций, применяющих процесс сварки трением с перемешиванием, среди которых можно отметить Боинг, Эйрбас, NASA, Митсубиши, и ряд других предприятий на территории США, Европы, Китая и Японии, непрерывно растет [4].

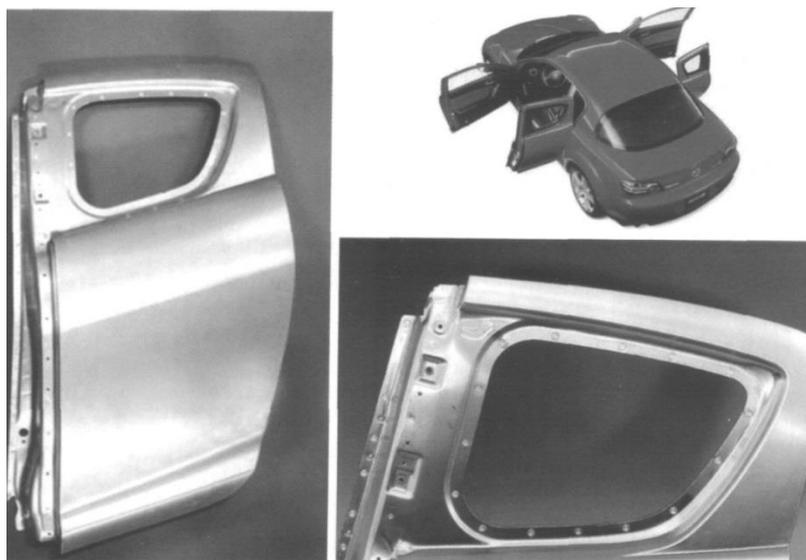


Рисунок 3. Соединения, выполненные на автомобиле Mazda RX – 8 с помощью точечной сварки трением с перемешиванием [9].

Применяя процесс СТП, в США изготавливаются крупные корпусные детали спутников, ракет и других изделий авиационной и космической отраслей промышленности, в том числе из алюминиевых сплавов высокой прочности [4]. До недавнего времени общепринятая технология изготовления корпусов космической техники, была основана на сварке плавлением толстых пластин из алюминиевых сплавов с их последующим фрезерованием для получения т.н. «вафельной» структуры. Такая структура обеспечивает достаточную прочность и снижение веса конструкции. Компании Боинг и Space X усовершенствовали технологию, применяя СТП. Их технология основана на сварке оболочки из тонких листов металла с дальнейшим привариванием к оболочке ребер жесткости [4].

Использование технологии СТП позволяет снизить долю заклепочных и крепежных соединений в изделиях авиационной промышленности, что повышает их надежность и снижает стоимость.

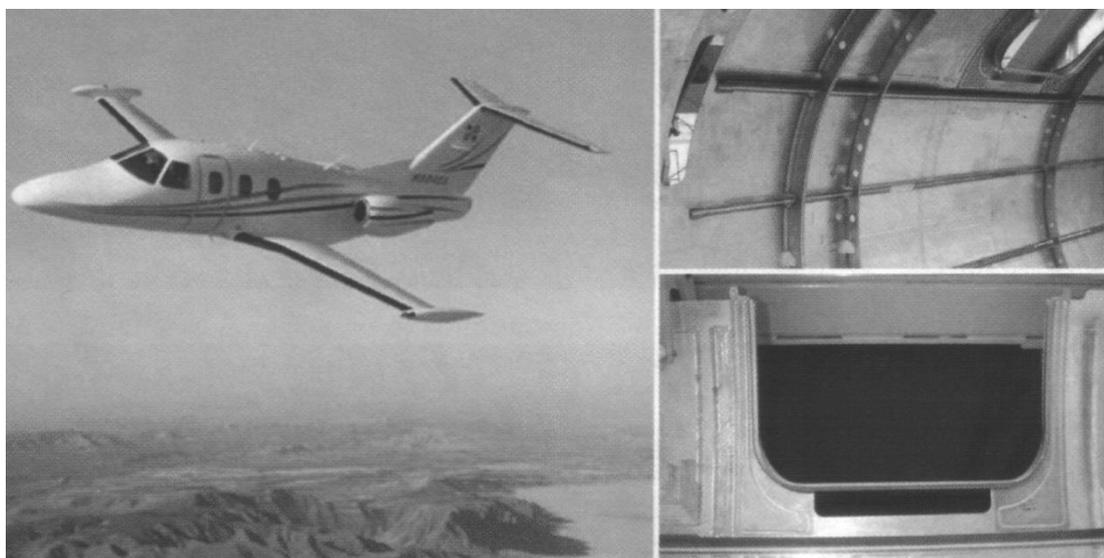


Рисунок 4. Самолет Eclipse 500 с узлами, изготовленными с использованием СТП [9]

В странах Европы компании, производящие железнодорожный транспорт, применяют технологию СТП в процессе изготовления крупных панелей, сваренных из алюминиевых профилей. В настоящее время ряд крупных машиностроительных компаний железнодорожной отрасли объединили усилия для повышения доли СТП в производстве железнодорожной техники [4].

Успешное внедрение СТП в производство в России реализовано на ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель». Предприятие интенсивно применяет метод СТП в производственном цикле цистерн различного транспортного применения и назначения [4].

В Государственном космическом научно-производственном центре имени М. В. Хруничева ведутся работы по внедрению технологии СТП в производство корпусных элементов ракет-носителей, выполненных из алюминиевых сплавов. В ряде технических институтов Российской Федерации ведутся работы по внедрению в промышленное производство способа СТП [10, 11].

Для промышленности Российской Федерации освоение и внедрение СТП в промышленное производство являются перспективными, поскольку открывают большие технологические и экономические возможности при использовании в авиационной, космической, транспортной и других отраслях.

### **1.3 Основные преимущества и недостатки метода СТП**

Сварка трением с перемешиванием обладает рядом преимуществ по сравнению с остальными методами сварки. Основные преимущества можно разделить на 3 группы: металлургические, технологические, энергетические.

Металлургические преимущества [12]:

- сварочный процесс протекает в твердой фазе, что снижает количество дефектов, вызванных фазовыми и структурными превращениями;
- низкая температурная деформация и шероховатость сварных соединений, за счет чего увеличивается коррозионная стойкость;

- низкая усадка, поскольку температура сварки ниже температуры плавления металла;
- сварка без потерь легирующих элементов: легирующие элементы в составе сплавов не выгорают, так как температура материала не доходит до температуры плавления;
- отсутствие газовой пористости в структуре сварного шва;
- мелкозернистая микроструктура;
- отсутствует растрескивание, так как сварочные швы получаются беспористыми и без остаточных напряжений;

Технологические преимущества:

- формирование неразъемного соединения можно осуществлять без применения защитного газа и выполнять сварку в любом пространственном положении;
- минимальные требования к очистке свариваемых поверхностей, что экономит время, расходуемые на вспомогательные операции;
- отсутствие шлифовальных отходов, т.к. швы не нуждаются в зачистке;
- отсутствие растворов для обезжиривания;
- сокращение расходуемых материалов, таких как проволока, коврики и др. газы;
- отсутствие выделения вредных веществ.
- возможность легкой автоматизации процесса сварки, что обеспечивает стабильное качество швов без высокой квалификации оператора.
- сокращение затрат на подготовку производства.

Энергетические преимущества:

- снижение веса конструкций за счет применения более прочных сплавов, что приводит к сокращению расхода топлива в легковесных авиа, автомобильных и судовых конструкциях [12];
- малая энергоемкость процесса (нет затрат на разогрев и плавление металла) [13];

К недостаткам метода СТП можно отнести следующие положения [13]:

- номенклатура свариваемых материалов ограничивается номенклатурой материалов инструмента;
- необходим подбор технологических параметров процесса сварки, поскольку их нарушение приводит к образованию дефектов;
- необходимость использования технологических элементов для ввода и вывода инструмента с их последующим удалением;
- многофакторность процесса сварки, затрудняющая прогноз структурных и механических характеристик получаемых сварных соединений.

#### **1.4 Технологические возможности способа сварки трением с перемешиванием**

Наиболее распространенными видами соединения для СТП является соединения встык и внахлест. Простое прямое стыковое соединение (соединение без скоса кромок) показано на рисунке 5. Две плоские заготовки с одинаковой толщиной ставятся на опорную плиту и фиксируются, предотвращая смещение примыкающих поверхностей относительно друг друга. В процессе внедрения инструмента в заготовку на материал действуют значительные по величине усилия, поэтому фиксация должна быть надежной. Вращающийся инструмент врезается в линию стыка до плотного контакта заплечика с поверхностью плиты, и перемещается в направлении скорости сварки, формируя сварное соединение.

Для простого нахлесточного соединения две плоские заготовки, устанавливаются друг на друга внахлест и фиксируются. Вращающийся инструмент вертикально внедряется с верхней до нижней заготовки и перемещается по заданной траектории, соединяя заготовки. Часто соединения внахлест выполняются точечной сваркой.

Помимо основных видов соединений, при необходимости методом СТП можно выполнять и другие, более сложные виды, за счет комбинирования стыковых и нахлесточных соединений. [14].

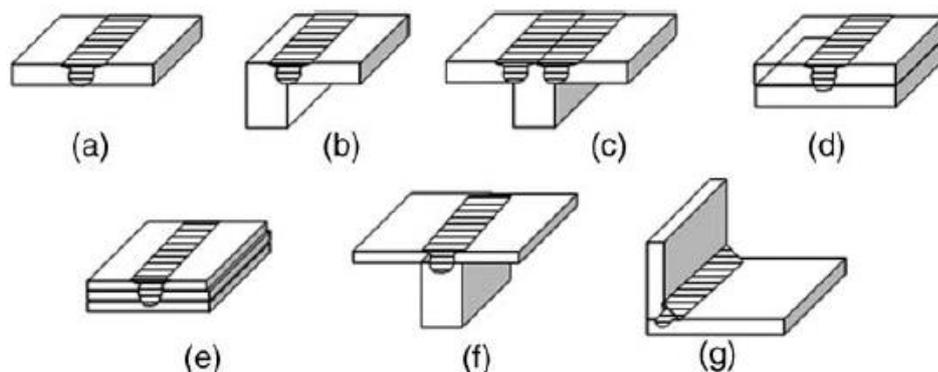


Рисунок 5. Типы соединения для СТП [14]

Надо отметить, что заготовки, соединяемые СТП встык и внахлест, не требуют предварительной очистки поверхностей. Две чистые металлические плиты могут быть легко соединены без учета состояния их поверхностного слоя.

### 1.5 Свариваемые материалы

Поскольку СТП реализуется в твердой фазе, процесс может быть применен для сварки широкого спектра материалов, к примеру, сварки разнородных алюминиевых сплавов и сталей [7]. Сварка материалов разного класса (к примеру, меди с алюминием) между собой затруднена в связи с образованием в процессе сварки интерметаллических фаз в сварном соединении [12].

#### Алюминий и алюминиевые сплавы

Первоначально СТП была разработана как способ для сварки алюминия и его сплавов, поскольку некоторые виды алюминиевых сплавов плохо свариваются существующими методами сварки плавлением, а

некоторые из них, такие как высокопрочные и термообрабатываемые сплавы, считаются не свариваемыми.

Трудности при сварке легированных алюминиевых сплавов возникают в связи с выгоранием и удалением из материала легирующих элементов, повышающих прочность. Например, такие элементы как литий легко окисляются или выгорают во время плавления металла, в результате этого получаемое сварное соединение имеет сниженные качественные характеристики [15].

Алюминий и его сплавы также подвергаются значительным температурным деформациям (до 4%) в процессе плавления и повторной кристаллизации [15]. Это может вызвать существенное нарушение формы свариваемых элементов и привести к образованию трещин из-за усадочных напряжений. Сварка трением с перемешиванием, являющаяся твердофазным механическим процессом, минимизирует влияние температурных деформаций и позволяет получать качественные соединения из широкого спектра алюминиевых сплавов.

#### Магний и магниевые сплавы

Существует широко распространенное мнение, что магний трудно сваривать с помощью методов сварки [7]. Поэтому, как только стали известны технологические возможности способа СТП на примере сварки алюминиевых сплавов, возник интерес к применению способа для сварки магниевых сплавов. В результате установлено, что магниевые сплавы также могут быть сварены способом СТП. К примеру, Технологический центр (Йоркшир) ТИС (TWI) разработал процесс сварки магниевых пластин толщиной 75 мм и размерами 1,3х3 м [13].

#### Медь и медные сплавы

Высокая тепло- и электропроводность меди и ее сплавов долгое время затрудняли их сварку. Способ СТП представляется перспективным для

сварки этих материалов, поскольку в процессе сварки производится не плавление, а термомеханический локальный разогрев. Исследования компании SKB показали положительные результаты при сварке плоских образцов медных сплавов [13]. Экспериментальная установка, созданная на базе TWI, позволила сваривать детали, толщиной до 50 мм [13].

#### Гафний и цирконий

Гафний и цирконий представляют собой металлы для специального применения в нефтехимической, нефтеперерабатывающей и энергетической промышленности. Исследования показали, что оба металла могут быть соединены сваркой трением с перемешиванием [16].

#### Жаропрочные (супер-) сплавы

Жаропрочные (инконель) и другие высокотемпературные сплавы были разработаны для использования в конструкции газотурбинных двигателей, работающих при высоких температурах. Сварка таких сплавов затруднена из-за растрескивания и микроструктурной сегрегации легирующих элементов в результате термического воздействия [13], что может быть потенциально решено применением метода СТП. Применения способа СТП для сварки подобных материалов представляется перспективным, однако необходима совершенствование инструментальных материалов и отработка параметров сварочного процесса в связи с высокой температурой их пластификации [13].

#### Сталь

На сегодняшний день способ СТП позволяет получать сварные швы протяженностью до 30 м в конструкциях из сталей различного типа [7]. При этом сварные швы демонстрируют превосходные механические свойства [13], а их стойкость к коррозии и усталостные свойства превосходят свойства сварных швов, полученных сваркой плавлением.

Преимущества, связанные со применением способа СТП для сварки сталей [13]:

- уменьшение искажений и, следовательно, снижение затрат на исправление брака;
- пониженное образование дефектов, поэтому сокращаются затраты на доработку и неразрушающий контроль;
- улучшенные свойства сварных соединений (механические и коррозионные);
- возможность сварки сталей, которые трудно или невозможно сваривать с помощью других методов;
- снижение затрат на оплату труда, обучение и сертификацию;
- снижение потребления энергии;

#### Титан

Несмотря на то, что большинство обычных титановых сплавов свариваются обычными способами сварки, могут возникать проблемы с деформацией заготовки и низким качеством сварного шва. Кроме того, некоторые из титановых сплавов трудно сваривать с помощью сварки плавлением.

В 1995 году в рамках внутренней исследовательской программы TWI была проведена сварка технически чистого титана, что доказало возможность применения СТП к титановым сплавам [7].

На сегодняшний день при сварке титановых сплавов способом СТП достигнуты следующие результаты [13]:

- осуществлена сварка сплавов Ti, VT-6 и VT-14;
- при сварке сплава VT-6 толщиной 6,35 мм прочность на разрыв сварного шва достигла прочности исходного сплава;
- стоимость технологической оснастки и инструмента для сварки титановых сплавов является высокой.

#### Разнородные материалы

Поскольку СТП представляет собой твердофазный процесс, который механически перемешивает металлы для образования связи между ними, его можно использовать для соединения разнородных металлов. Процесс получения соединения упрощается, когда соединяемые металлы имеют одинаковые термические свойства и температуры текучести. Например, Технологический институт сварки успешно соединил медь, серебро и золото, копируя древнюю японскую технологию мокей-гана для изготовления украшений, но с гораздо меньшим количеством отходов, чем традиционный ручной метод [12].

### **1.6 Параметры процесса сварки трением с перемешиванием**

Сварка трением с перемешиванием является комплексным процессом и включает в себя перемещение материала и пластическую деформацию. Режимы сварки и геометрия инструмента оказывают значительный эффект на характер течения материала и распределение температуры, тем самым влияя на изменение его микроструктуры.

#### **Геометрия инструмента**

Геометрия инструмента играет важную роль в процессе СТП, так как влияет на движение материала, и в свою очередь, определяет скорость сварки. Инструмент состоит из заплечика и стержня как показано на рисунке 6 [17]. Он выполняет две главные функции: локальный нагрев и перемещение материала. На начальном этапе внедрения инструмента нагрев возникает, прежде всего, за счет трения между стержнем и заготовкой. Дополнительным фактором повышения температуры является деформация материала. Инструмент погружается до соприкосновения заплечика с заготовкой. Трение между заплечиком и заготовкой является основным источником нагревания в процессе СТП. Здесь самым важным параметром инструмента является относительный размер стержня и заплечика. Кроме того, заплечик удерживает нагретый объем материала, определяя размеры сварного

соединения. Второй функцией инструмента является перемешивание и перемещение материала. Конструкция инструмента определяет и нагрузки на инструмент в процессе сварки и однородность микроструктуры. (операционная) нагрузка регулируются конструкцией инструмента. Обычно используется вогнутый заплечик и резьбовой цилиндрический стержень [18].

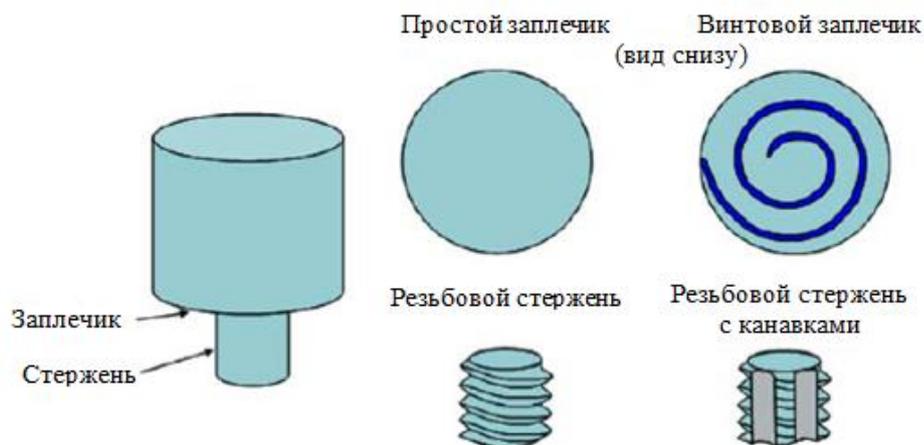


Рисунок 6. Инструмент сварки трением с перемешиванием [18]

### Режимы сварки

Для СТП самыми важными являются два параметра: частота вращения инструмента  $\omega$  (об/мин) и скорость перемещения инструмента  $v$  (мм/мин) вдоль линии стыка (скорость сварки). В результате вращения инструмента перемешивается материал вокруг вращающегося стержня и по мере продвижения инструмента вдоль стыка нагретый материал переходит с передней на заднюю часть стержня. Следует отметить, что фрикционное сцепление (сопряжение) инструмента с поверхностью заготовки определяет степень разогрева металла. Коэффициент трения в зоне контакта будет меняться с увеличением частоты вращения [19], соответственно, будет повышаться температура нагрева.

Наряду с частотой вращения инструмента и скоростью перемещения, еще одним важным параметром процесса является угол наклона шпинделя

или положение инструмента относительно поверхности заготовки. Подходящее наклонное положение шпинделя обеспечивает удержание перемешанного материала, и перемещение материала с передней части на заднюю часть стержня заплечиком инструмента. Также глубина ввода стержня в заготовку (также называется целевая глубина) очень важна для получения качественного сварного шва с помощью гладкого заплечика инструмента. Глубина ввода стержня зависит от его высоты и определяется усилием внедрения. Если глубина ввода слишком маленькая, заплечик инструмента не контактирует с исходной поверхностью заготовки. Таким образом, вращающийся заплечик не сможет эффективно переместить металл с передней на заднюю часть стержня, в результате которого сварной шов может получиться с внутренними трещинами (порами) и поверхностной шероховатостью. Если глубина ввода слишком большая, то заплечик внедряется в заготовку, обеспечивая «провал» инструмента и выдавливая расплавленный металл к краю сварного соединения с образованием дефектов [19].

#### Течение материала

Течение материала при СТП является сложным процессом и зависит от геометрии инструмента, параметров сварки и от вида свариваемого материала. Понимание характеристик течения материала имеет практическую ценность для оптимизации конструкции инструмента и обеспечения высокого качества сварных швов. Это обуславливает многочисленные исследования, направленные на определение закономерностей течения материала при СТП. Ряд методов, такие как метод индикаторов по эталону, сварка разнородных сплавов и металлов, использовались для визуализации закономерности течения материала в СТП. Кроме того, некоторые вычислительные методы, включающие расчеты методом конечных элементов, также были использованы для моделирования течения материала [20].

Авторы предложили, что получающиеся в результате СТП микроструктура и течение материала схоже с нагревом микроструктуры обычной алюминиевой экструзии и поковки [21]. Поэтому процесс СТП может быть смоделирован как металлообрабатывающий процесс с пятью зонами металлообработки: предварительный нагрев, начальная деформация, экструзия, поковка, и охлаждение (рисунок 7) [8]. В зоне предварительного нагрева в передней части стержня температура растет вследствие трения вращающегося инструмента и адиабатического нагрева из-за деформации материала. Тепловые свойства материала и скорость перемещения инструмента влияют на степень и скорость нагревания этой зоны. По мере продвижения инструмента вперед, когда материал нагревается выше предельной температуры, образуется зона начальной деформации, и величина нагрузки превышает предельное напряжение текучести материала, вызывая течение материала. Материал в этой зоне проникает на обе стороны: вверх на зону заплечика и вниз на зону экструзии, как показано на рисунке 4. Маленький объем материала захватывается в вихревую зону ниже кончика стержня, где наблюдается вихревой характер течения. В зоне экструзии ограниченной ширины материал передвигается вокруг стержня с передней на заднюю часть. Предельная температура с каждой стороны инструмента определяет ширину зоны экструзии, где величина нагрузки и температура недостаточны для движения металла. После зоны экструзии следует зона проковки, где материал спереди инструмента под гидростатическим давлением проникает в свободном месте, образуя при поступательном движении стержня. Заплечик инструмента помогает придавить материал, находящийся в этом свободном месте, и также воздействует давлением за счет осевого усилия проковки. Материал с зоны заплечика протягивается через стык с задней стороны на переднюю. За зоной проковки следует зона охлаждения, где материал остывает при пассивном или форсированном режимах охлаждения. Авторами [12] разработан простой метод для моделирования потока металла зоны экструзии, который показывает

взаимосвязь между геометрией инструмента, операционными параметрами, и напряжениями текучести соединяющихся материалов. Установлено, что расчетная температура, ширина экструзионной зоны, скорость деформации и давление экструзии, полученные этим расчетным методом, совпадают с экспериментальными данными.

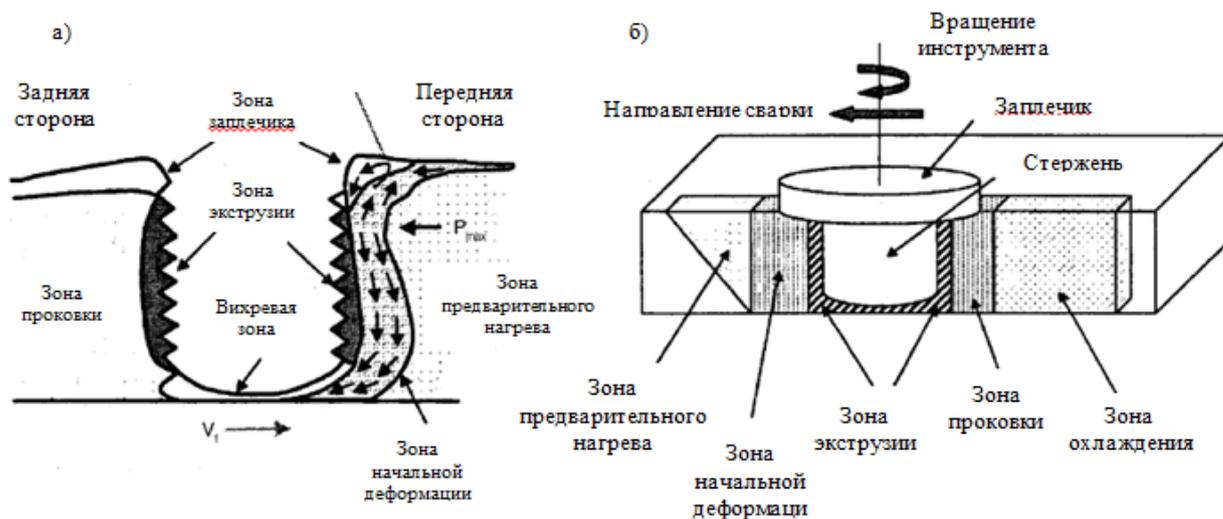


Рисунок 7. (а) – характер движений потока металла, (б) – зоны металлургической обработки при СТП [12]

### Распределение температуры

Поскольку температурное распределение внутри и вокруг зоны перемешивания напрямую влияет на микроструктуру сварного шва, его исследования требуют пристального внимания. Однако измерение температуры перемешанной зоны является очень сложным за счет интенсивной пластической деформации, возникающей при вращении и перемещении инструмента. Поэтому максимальная температура внутри перемешанной зоны во время СТП рассчитывается с учетом данных микроструктуры сварного шва или косвенно измеряется с помощью встраиваемых в близлежащую от вращающегося инструмента зону термопар [7].

Множество факторов влияют на температурное распределение при СТП. Из многочисленных экспериментальных исследований и моделирования процесса можно сделать следующие выводы [7]:

- максимальная температура внутри сварочной зоны ниже температуры плавления алюминия;

- основную роль в разогреве металла играет заплечик инструмента;

- максимальная температура увеличивается с увеличением частоты вращения инструмента при постоянной скорости сварки и, наоборот, уменьшается с увеличением скорости сварки при постоянной частоте вращения. Кроме того, она увеличивается с увеличением соотношения частоты вращения инструмента на скорость сварки.

- максимальная температура наблюдается на самой верхней поверхности сварочной зоны. Существует множество теоретических и эмпирических моделей, описывающих разогрев металла. Общая картина включает фрикционное и адиабатическое нагревание. Фрикционное нагревание зависит от поверхностной скорости и коэффициента трения. Поэтому степень разогрева должна возрастать с центра заплечика инструмента на его конечные кромки. Стержень также обеспечивает некоторый фрикционный разогрев. Наряду с этим, адиабатическое нагревание может достигать максимума на поверхностях стержня и заплечика и уменьшается по мере отдаления от стыка. В работе [14] показано, что фрикционное состояние меняется с «заклинивания» при низких частотах вращения на «прерывистое состояние» при высоких частотах вращения инструмента.

#### Изменения микроструктуры

Интенсивная пластическая деформация и высокотемпературное воздействие внутри зоны перемешивания во время СТП вызывает рекристаллизацию, развитие структуры, растворение и укрупнение осадков. На основе микроструктурной характеристики зерен и осадков были

выделены три отдельные зоны – перемешанная зона ПЗ, зона термомеханического воздействия ЗТМВ, зона термического влияния ЗТВ (рисунок 8). Изменения микроструктуры в различных зонах оказывают большое влияние на механические свойства после сварки. Поэтому эволюция микроструктуры в ходе процесса СТП интенсивно исследуется.

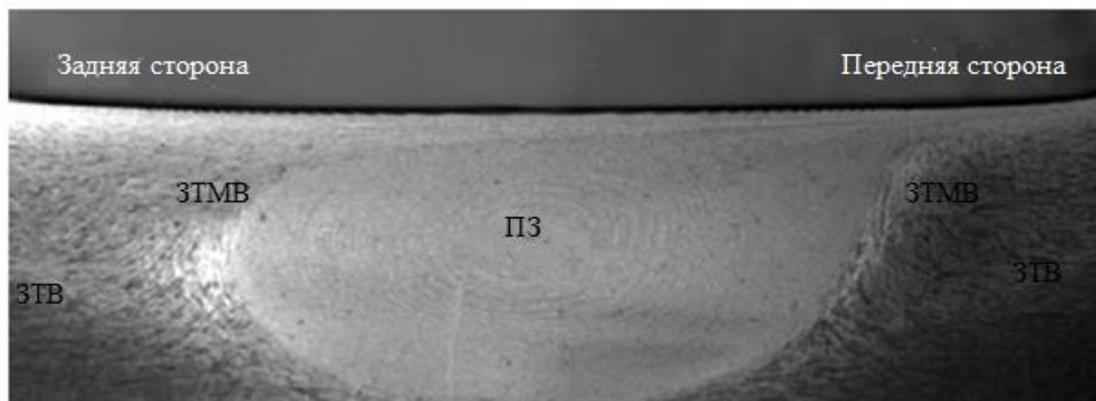


Рисунок 8. Макроскопический снимок различных микроструктурных зон при СТП сплава алюминия 7075Al-T651 (стандартный резьбовой стержень, 400 об/мин и 51 мм/мин) [12]

#### Зона перемешивания

Зону перемешивания также называют динамически рекристаллизованной зоной. Внутри рекристаллизованных зерен обычно наблюдается низкая плотность дислокаций. Однако некоторые исследования показывают, что маленькие рекристаллизованные зерна этой зоны имеют высокую плотность субгрануц, субзерен, дислокаций [15]. Граница между рекристаллизованной перемешанной зоной и основным металлом сравнительно рассеянная на задней стороне инструмента и довольно сжатая в передней стороне. В основном, зона перемешивания может быть классифицирована на два типа: тарельчатая перемешанная зона, которая расширяется вблизи верхней поверхности и эллиптическое ядро сварного соединения.

В работе [14] приведены данные о формировании тарельчатого ядра сварного соединения при сварке трением с перемешиванием. Отмечено, что верхняя поверхность, контактирующая с цилиндрическим заплечиком инструмента, подвергается экстремальной деформации и фрикционному нагреванию, тем самым образуя зону тарельчатой формы.

Рейнолдс, профессор университета Южной Каролины, исследовал взаимосвязь между размерами ядра сварного соединения и стержня. Установлено, что перемешанная зона была немного больше, чем диаметр стержня, за исключением нижней части сварного соединения. Кроме того, установлено, что при увеличении диаметра стержня ядро сварного соединения имеет более округленную форму с максимальным диаметром в середине шва [12].

#### Зона термического влияния

Эта зона подвергается воздействию термического цикла, но не поддается пластической деформации. Исследователи охарактеризовали эту зону как зону, подвергающуюся температурному воздействию выше 250°C для термо-обрабатываемых сплавов алюминия. В зоне термического влияния сохраняется такая же зеренная структура, как у основного материала. Однако, тепловое воздействие выше 250°C оказывает значительный эффект на фазовую структуру [15].

В течение процесса СТП тепловая и механическая нагрузки увеличиваются в стыке и вокруг него за счет местного нагревания и сопровождающего напряжения, и остаточное напряжение обычно приближается к пределу текучести базового материала. Согласно широко распространенным убеждениям, остаточные напряжения при сварке трением с перемешиванием характеризуются невысокими значениями в связи с низкотемпературным твердотельным процессом СТП [7].

## Зона термомеханического воздействия

Уникальностью процесса СТП является формирование переходной зоны – зоны термомеханического воздействия (ЗТМВ) между исходным материалом и зоной перемешивания, как показано на рисунке 9. В зоне ЗТМВ во время процесса СТП материал испытывает как температурное, так и деформационное воздействие. Типичное изображение ЗТМВ показано на рисунке 8. Эта зона характеризуется сильно деформированной структурой. Длинные зерна исходного материала деформируются вокруг зоны перемешивания. Несмотря на то, что ЗТМВ подвергается пластической деформации, рекристаллизация в этой зоне не происходит из-за недостаточной степени деформированности и разогрева материала. Однако растворение характерным для этой зоны является растворение некоторых фаз, возникающее из-за воздействия высокой температуры во время СТП [17]. Степень растворения зависит от термического цикла, испытываемого зоной термомеханического воздействия. Кроме того, характерной особенностью является то, что зерна в ЗТМВ обычно содержат высокую плотность субграниц [12].

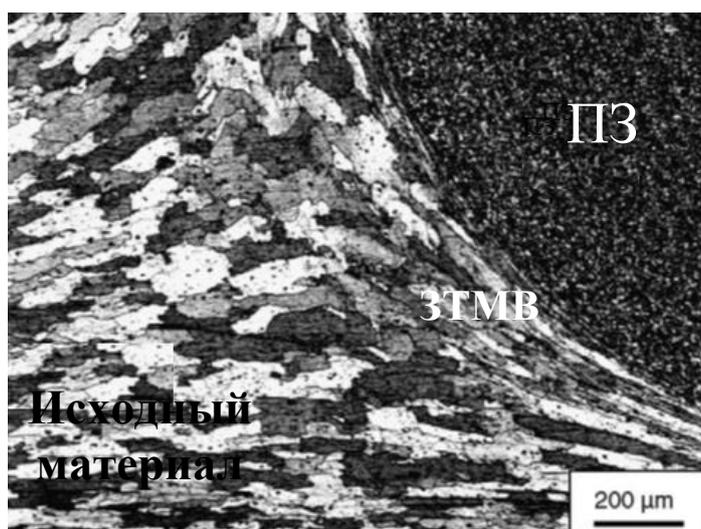


Рисунок 9. Микроструктура зоны термомеханического воздействия при СТП сплава В95 [16]

## Глава 2

### Методика исследований

#### 2.1 Исследуемый материал

Сплав Д16Т является одним из самых востребованных дюралюминиевых сплавов в судостроительной, авиационной и космической промышленности. Он относится к алюминиевым сплавам системы Al-Cu-Mg, и легируется марганцем для повышения стойкости к коррозии. Химический состав дюралюминия Д16Т строго регламентируется ГОСТом 4784-97 и расшифровывается следующим образом [22]:

- Д – дюралюминий;
- 16 – номер сплава в серии;
- Т – закаленный и естественно состаренный.

Дюраль алюминий имеет следующий химический состав ГОСТ 4784-97:

- Al – 90,8-94,7%
- Cu – 3,8-4,9%
- Mg – 1,2-1,8%
- Mn – 0,3-0,9%
- Fe – не больше 0,5%
- Si – не больше 0,5%
- Zn – не больше 0,3%
- Ni – не больше 0,1%
- Ti – не больше 0,1%

Марганец улучшает коррозионную стойкость и механические свойства сплава, при этом не образуя с алюминием общих упрочняющих фаз. При твердости сплава в НВ  $10^{-1}=42$  МПа, сплав Д16Т имеет крайне небольшой удельный вес – 2800 кг/м<sup>3</sup>. Благодаря низкой теплопроводности сплав хорошо проявляет себя при температурах от 120 °С и до 250 °С, однако не рекомендован к использованию при температуре выше 500 °С даже

кратковременно. Он не склонен к образованию трещин, но при повышении температуры выше 80 °С склонен к образованию межкристаллитной коррозии, что накладывает определённые ограничения на его применение. Искусственное состаривание сплава позволяет избежать образования коррозии, однако при этом происходит уменьшение прочности и пластичности [23].

Сплав обладает рядом преимуществ, что делает его востребованным и широко применяемым. Получаемый из него металлопрокат обладает [22]:

- стабильной структурой;
- высокими прочностными свойствами;
- в 3 раза более легким весом, чем стальные изделия;
- повышенным сопротивлением микроскопической деформации в процессе эксплуатации;
- хорошей механической обрабатываемостью на токарных и фрезерных станках, уступая лишь некоторым другим алюминиевым сплавам.

Изделия из дюралюминиевых пластин используются в важнейших аэрокосмических компонентах, таких как конструкции фюзеляжа, элементы натяжения крыла, срезные ленты, ребра и конструктивные области, где требуются жесткость, усталостные характеристики и хорошая прочность.

Листовые изделия широко используются как в коммерческих, так и в военных самолетах для фюзеляжей, крыльев и зон двигателя, где часто встречаются повышенные температуры до 121°С. Также часто используется:

- в конструкциях морских и речных судов;
- для изготовления деталей для машин и станков;
- для производства обшивки и лонжеронов автомобилей, вертолетов;
- для изготовления дорожных знаков и уличных табличек;
- в химической и топливной промышленности.

Незаменимы трубы Д16Т при производстве нефтяного сортамента. Эксплуатационные колонны, собранные из них способны обеспечить

бесперебойную эксплуатацию скважины в течение 8 лет. В отличие от стального трубного проката, дюралюминиевые трубы пластичны, легки в транспортировке, прочны и имеют гладкую поверхность. Единственный минус труб Д16Т – склонность к коррозии при длительных нагревах, в агрессивной кислой или газовой среде. Однако, данная проблема успешно решается с помощью неорганических ингибиторов, которые создают на поверхности труб толстую оксидную пленку и снижают их чувствительность к межкристаллитному разрушению.

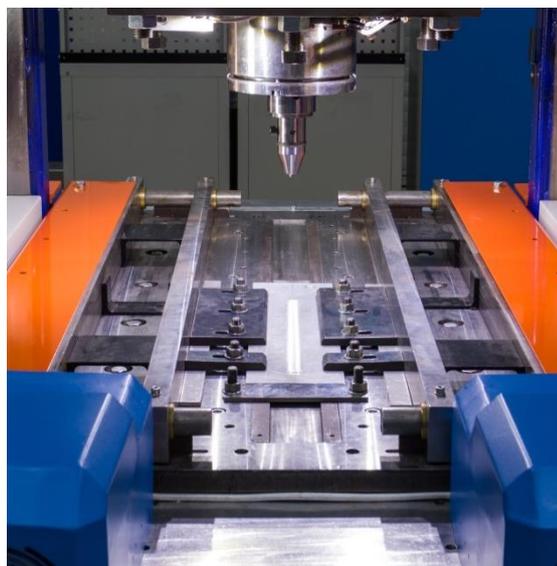
## 2.2 Подготовка образцов

Для оценки влияния режимов СТП на качество сварных соединений были получены образцы сварных соединений из листов сплава марки Д16Т толщиной 5,0 мм. В качестве заготовок использовались листы с размерами 500x120 мм.

Образцы были получены при помощи оригинального оборудования – стенда экспериментальных исследований режимов сварки трением с перемешиванием (рисунок 10).



а



б

Рисунок 10. Стенд экспериментальных исследований режимов сварки

трением с перемешиванием: а – общий вид станда; б – образец сварного соединения, размещенного на станде.

Подготовка образцов сварных соединений заключалась в следующем. Из листового проката вырезались заготовки с припуском на механическую обработку. Далее образцы подвергались предварительной высокоскоростной механообработке с целью снятия плакированного слоя. Обработка проводилась на плоскости вблизи свариваемых кромок по всей длине заготовки. Эта процедура выполняется с целью избегания попадания плакирующих элементов в структуру сварного соединения. После снятия плакированного слоя обработке также подвергались торцы свариваемых кромок с целью их плотного прижима друг к другу без зазоров при сварке (рисунок 11). Обработка проводилась на станде экспериментальных исследований с установленным на нем высокоскоростным фрезерным шпинделем.



Рисунок 11. Операция предварительной механообработки кромок свариваемых заготовок.

После механообработки производилась сварка образцов сварных соединений. Для этого образцы устанавливались в технологическую оснастку станда. В шпиндель станда устанавливался сварочный инструмент, выполненный из быстрорежущей стали Р6М5. Характеристическое изображение инструмента приведено на рисунке 12.



Рисунок 12. Используемый сварочный инструмент

Образцы были получены при различных режимах сварки трением с перемешиванием. Осевое усилие на сварочном инструменте составляло 2600 кг, скорость перемещения инструмента – 320 мм/мин. Изменяемым параметром являлась скорость вращения инструмента, поскольку она вносит основной вклад в условия разогрева и перемешивания металла в сварном соединении. Скорость вращения инструмента изменяли в диапазоне 200 – 1000 об/мин. В результате выполнения операций сварки были получены образцы сварных соединений при скоростях вращения инструмента 200, 400, 600, 800 и 1000 об/мин (рисунок 13).



а



б

Рисунок 13. Образцы сварных соединений: а – процесс получения; б – характерное изображение.

## 2.3 Исследования механических характеристик сварных соединений

2.3.1 Влияние режима сварки на качество сварного соединения оценивали по следующим механическим характеристикам, полученным в результате испытаний:

- временное сопротивление  $\sigma_B$ , МПа;
- предел текучести условный  $\sigma_{0,2}$ , МПа;
- относительное удлинение после разрыва  $\delta$ , %;
- угол изгиба  $\alpha$ , град.;
- ударная вязкость  $a_H$ , Дж/см<sup>2</sup>;
- число циклов до разрушения  $N$ , шт.

Характеристики  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ , и  $\delta$  оценивались по результатам испытаний на растяжение. Образцы изготавливали согласно требованиям ГОСТ Р ИСО 4136-2009 поперек сварного соединения, чтобы после механической обработки сварное соединение располагалось посередине его рабочей части (рисунок 14). Для каждого режима сварки было изготовлено не менее 5 образцов для определения механических характеристик.

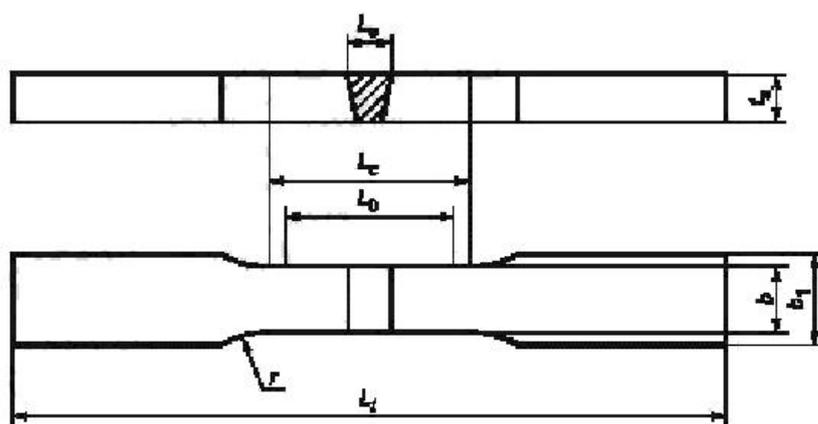


Рисунок 14. Образцы для испытаний на растяжение.

Испытания на растяжение проводили с помощью универсальной испытательной машины УТС 110М-100 при нарастающей нагрузке согласно ИСО 6892-1:2009. В процессе испытаний проводилась запись диаграммы растяжения с определением временного сопротивления при разрыве  $\sigma_B$ ,

условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  и относительного удлинения после разрыва  $\delta$  согласно требованиям эксплуатационной документацией универсальной испытательной машины. Скорость испытания составляла 15 мм/мин. Результаты определяли как среднее арифметическое по формуле (1):

$$T_{\text{иср}} = \sum_{i=1}^I T_i / I, (1)$$

где  $T_i$  — значение величины, полученное в результате испытания  $i$ -го образца;

$I = 5$  — число испытаний.

2.3.2 Важным свойством, характеризующим возможность применения неразъемного соединения для изделий и конструкций, при эксплуатации которых такое соединение подвергается существенному изгибу, является его способность подвергаться изгибу без разрушения. Числовой характеристикой данного свойства является величина угла изгиба, которую может выдержать образец до появления трещин.

Для определения угла изгиба  $\alpha$  из каждого объекта исследований было изготовлено 5 образцов неразъемных соединений согласно требованиям ГОСТ 6996-66 типа XXVII (рисунок 15). Образцы вырезали в горизонтальной плоскости поперек сварного соединения.

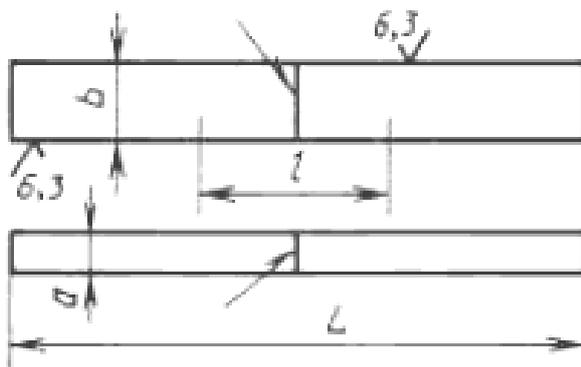


Рисунок 15. Образец для проведения испытаний на статический изгиб

Исследования на статический изгиб по ГОСТ 6996-66 выполняли с помощью универсальной испытательной машины УТС 110М-100 с

соответствующей оснасткой. Испытания проводили со скоростью нагружения 5 мм/мин до появления в растянутой зоне образца первой трещины, длина которой превышает 20 % ширины образца или до параллельности или соприкосновения сторон образца. Угол изгиба при испытании до образования первой трещины измеряли с помощью специального приспособления с градуированной шкалой в ненапряженном состоянии, после снятия нагрузки, с погрешностью до  $\pm 2^\circ$ .

Результаты определяли по формуле (1) как среднее арифметическое результатов, полученных при испытании всех образцов для определения механических характеристик.

2.3.3 Для нахождения ударной вязкости  $a_n$  из каждого сварного соединения изготавливали не менее 5 образцов согласно ГОСТ 6996-66 с надрезом в верхней части шва. Образцы вырезались в горизонтальной плоскости поперек сварного соединения.

С помощью маятникового копра 2130 КМ-0,3 проводили испытания на ударную вязкость образцов для определения механических характеристик. Максимальная энергия удара маятника копра 300 Дж. Значения ударной вязкости регистрировали в диапазоне от 1 до 9 кгс/см<sup>2</sup> (0,1 – 0,9 МПа).

Результаты определяли по формуле (1) как среднее арифметическое результатов, полученных при испытании всех образцов для определения механических характеристик.

2.3.4 Для определения числа циклов до разрушения каждого из полученных сварных соединений изготавливали не менее 5 образцов для определения механических характеристик типа IV по ГОСТ 25.502 шириной 20 мм, толщиной равной толщине листа основного металла.

С помощью испытательной машины УТС 110М-100 проводили испытания на малоцикловую усталость по схеме растяжение–разгрузка. Испытания проводили при асимметричном цикле нагружения, с постоянным коэффициентом асимметрии  $R_\sigma = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0,07$  и частоте 10 Гц согласно ГОСТ 25.502-79. За максимальное напряжение цикла  $\sigma_{\max}$  принимали

наибольшее по алгебраической величине напряжение, а за минимальное напряжение цикла  $\sigma_{\min}$  — наименьшее по алгебраической величине. Среднее напряжение цикла  $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$ .

Образцы для определения механических характеристик испытывали при максимальном напряжении в цикле  $\sigma_{\max}$ , составляющем 2/3 от предела прочности металла неразъемного соединения ( $2/3\sigma_b$ ). Минимальное напряжение составляло  $0,3\sigma_b$ , где  $\sigma_b$  — предел прочности основного материала. Регистрировали количество циклов до разрушения.

Результаты определяют по формуле (1) как среднее арифметическое результатов, полученных при испытании всех образцов для определения механических характеристик.

2.3.5 Оборудование и приборы, используемые для исследования механических характеристик сварных соединений, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Наименование, тип и марка	Кол-во	ГОСТ, ТУ или обозначение	Основные характеристики
Штангенциркуль ШЦК-300-0,02	1	ГОСТ 166-89	Диапазон измерений от 0 до 300 мм Цена деления 0,01 мм Погрешность измерения $\pm 0,03$ мм
Микрометр МК 211221	1	ГОСТ 6507-90	Диапазон измерений от 0 до 25 мм Цена деления 0,01 мм Погрешность измерения $\pm 0,004$ мм
Машина для испытания конструкционных материалов УТС 110М-100	1	ТУ 4271-003-99369822-08	Максимальная нагрузка: 30 кН в диапазоне от 0,003 до 350 мм/мин 100 кН в диапазоне от 0,001 до 50 мм/мин Пределы допускаемой погрешности $\pm 0,2\%$ от заданной скорости
Копер маятниковый 2130 КМ-0,3	1	ГОСТ 10708-82	Энергия копра до 300 Дж Скорость движения маятника в момент удара $5,4 \pm 0,1$ м/с

## 2.4 Исследования структурных характеристик сварных соединений

### 2.4.1 Методика подготовки образцов

Для проведения структурных исследований изготавливали шлифы по ГОСТ 27637. Для подготовки шлифа контролируемая поверхность обрабатывается с помощью шлифовальных шкур разной зернистости по ГОСТ 6456 и алмазной пасты зернистости АСМ 1/0, АСМ 0,5/0 ВОМ по ГОСТ 25593. Изготовленные и полированные образцы хранятся в условиях, исключающих окисление.

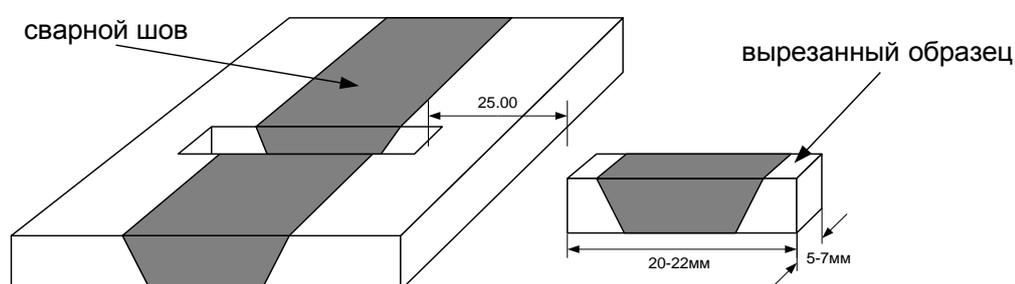


Рисунок 16. Образцы для подготовки шлифов

Подготовленные шлифы помещают в вытяжной шкаф и травят в смеси 5%-х водных растворов азотной, соляной и фтористоводородной кислот в соотношении (1:1:2) или (2,5:1,5:1,0). Травление осуществляют погружением в раствор, время травления должно составлять от 5 до 30 с. После окончания травления шлифы промывают водой и просушивают фильтровальной бумагой.

Для оценки величины зерна алюминиевых сплавов в области шва и околошовной зоне заготовку для приготовления шлифа вырезают в области шва площадью в поперечном сечении не менее  $1 \text{ см}^2$ , так чтобы в поле зрения попадали шов и околошовная зона в соответствии с требованием ГОСТ 21073.0. Травление производят до выявления границ зерен.

Для структурных исследований подготовленный шлиф обрабатывают химическим способом в реактиве до четкого выявления линии сварки, макро- и микроструктуры сварного шва. Для нейтрализации и удаления реактива

после травления поверхность шлифа промывается в струе холодной воды и просушивается с помощью фильтровальной бумаги.

#### 2.4.2 Исследование структуры на признаки пережога

2.4.3 Макроструктурный анализ проводят на подготовленных шлифах с помощью оптического микроскопа при увеличении  $\times 50$ – $\times 100$ . Дефекты неразъемных соединений выявляют помощью макроанализа. Определяют типы возможных внутренних дефектов сварных соединений — трещины всех видов и направлений, непровары, туннельные дефекты, оксидные включения и другие несплошности в соответствии с ОСТ 134-1051.

Микроструктуру сварного соединения контролируют с помощью металлографического микроскопа при увеличении  $\times 500$  на площади, равной пяти полям шлифа в разных зонах поверхности, ориентируясь по строчечным выделениям интерметаллидных фаз. Структурные признаки пережога и сопутствующие признаки определяются в соответствии с ГОСТ 27637 (Приложение 2). Признаки пережога определяются с помощью объект-микрометра по наличию межзеренных эвтектических прослоек и/или внутризеренных эвтектических образований как в зоне перемешивания, так и в зоне термомеханического влияния.

#### 2.4.4 Исследование размеров зерен сварного соединения

Для определения величины зерна алюминиевых сплавов на подготовленных шлифах с помощью металлографического микроскопа при увеличении  $\times 100$  методом секущих (ГОСТ 21073.3) определяют средний размер зерна, выполнив не менее 15 единичных измерений. Минимальные и максимальные величины среднеквадратичных отклонений определяются согласно ГОСТ 21073.0.

2.4.5 Оборудование и приборы, используемые для исследования структурных характеристик сварных соединений, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Наименование, тип и марка	Кол-во	ГОСТ, ТУ или обозначение	Основные характеристики
Микрометр МК 211221	1	ГОСТ 6507-90	Диапазон измерений от 0 до 25 мм Цена деления 0,01 мм Погрешность измерения $\pm 0,004$ мм
Микроскоп оптический	1	Альтами МЕТ-1С	Видимое увеличение от $\times 50$ до $\times 2000$ Окуляры: $\times 10$ (поле 22 мм); $\times 20$ (поле 12 мм) Диапазон перемещений стола 30x30 мм.
Микроскоп металлографический	1	Метам ЛВ-31	Предел измерений от $\times 50$ до $\times 1500$ Цена деления шкал: нониуса 0,1 мм, механизма микрометрической фокусировки 0,002 мм

## Глава 3

### Анализ результатов

#### 3.1 Результаты исследования механических свойств

Характерные изображения образцов после разрушения приведены на рисунке 17.

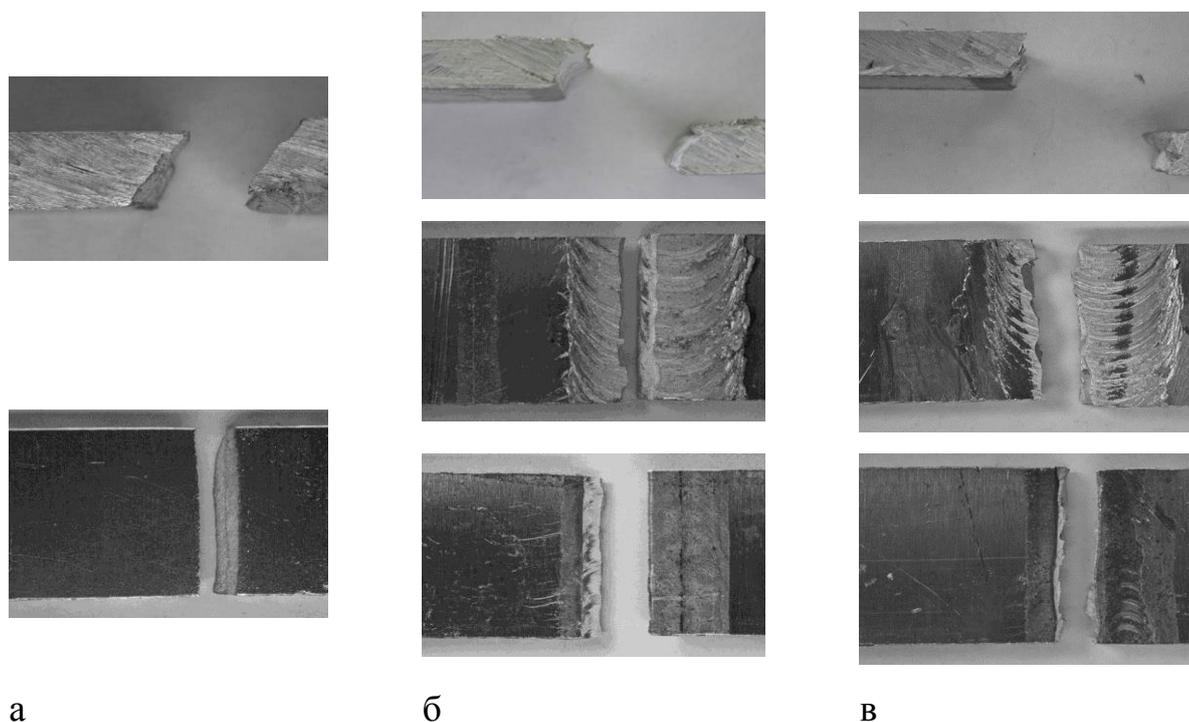


Рисунок 17. Изображения образцов после разрушения: а – исходный материал; б – образец шва при низких частотах вращения инструмента; в - образец шва при высоких частотах вращения инструмента.

Поверхность разрушения образца (рисунок 17, а) исходного материала имеет вид, характерный для вязкого разрушения материала. Образец, полученный при низких частотах вращения инструмента (рисунок 17, б), разрушается отслаиванием от нижней стороны шва по дуге практически на всей толщине шва. Этот участок составляет 80% толщины образца. Окончательный вязкий разрыв происходит на коротком участке, при этом что линия разрыва смещена относительно середины шва влево. Образец, полученный при высоких частотах, характеризуется не столь явным

характером разрушения, зона отслаивания имеет меньший размер (около 50% толщины образца), а зона вязкого разрушения имеет больший размер.

Указанные особенности подтверждаются кривыми разрушения. На рисунке 18 приведена кривая разрушения образца исходного металла. Кривая имеет типичный для металлов участок пластической деформации.

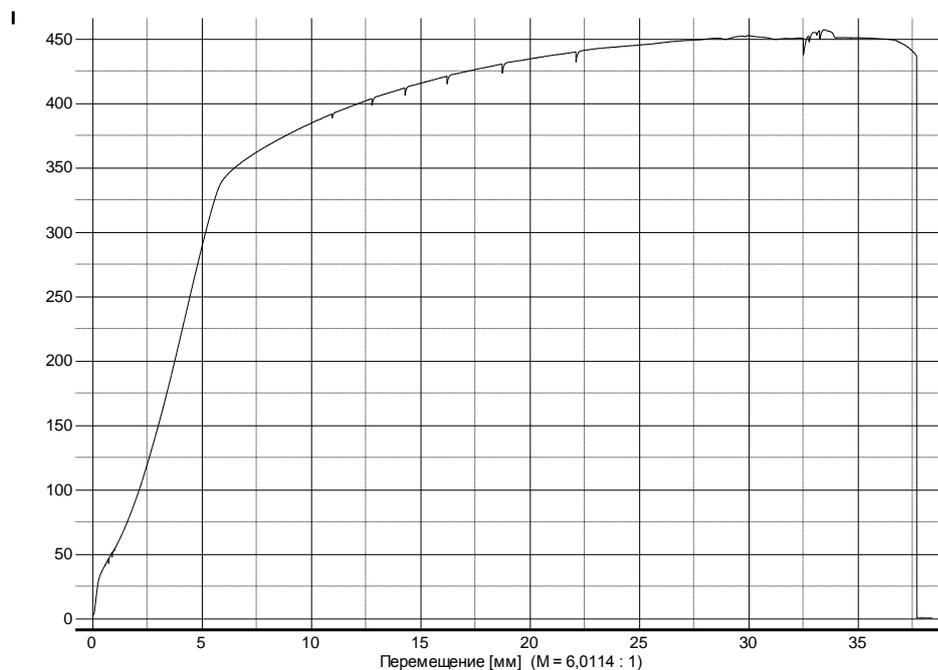


Рисунок 18. Кривая разрушения Д16Т

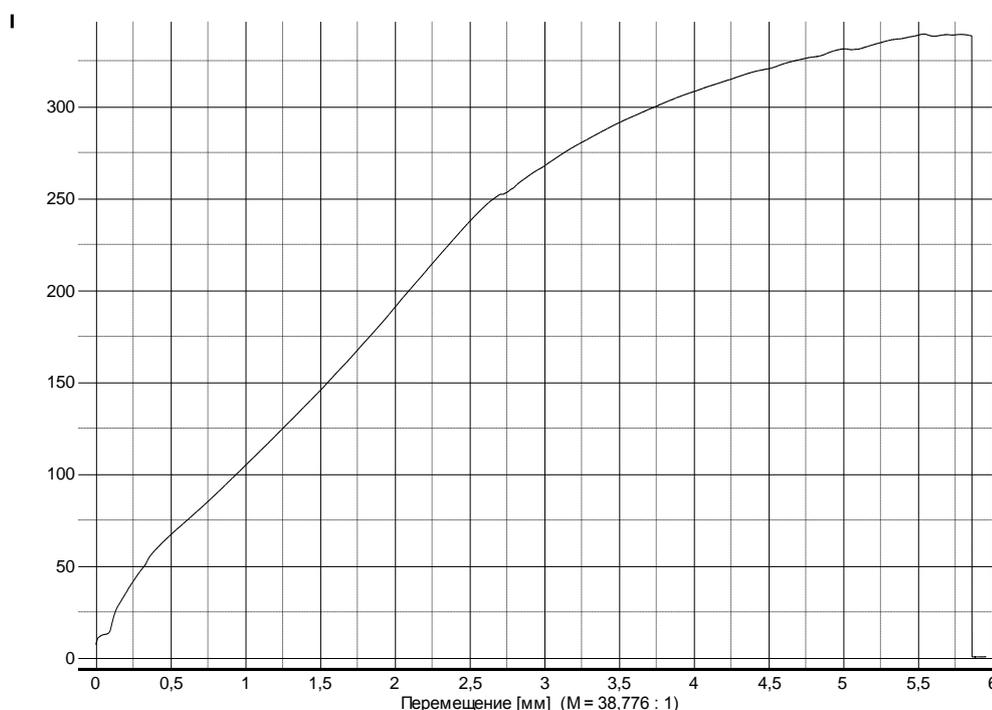


Рисунок 19. Кривая разрушения сварного шва при низких частотах вращения инструмента

На рисунке 19 приведена кривая разрушения для образцов сварных швов, полученных при низких частотах вращения инструмента. На кривой практически отсутствует участок пластической деформации, а разрушающее напряжение составляет 340 МПа против 450 МПа у исходного образца. На рисунке 20 приведена кривая разрушения, характерная для образцов сварных швов, полученных при высоких частотах вращения инструмента.

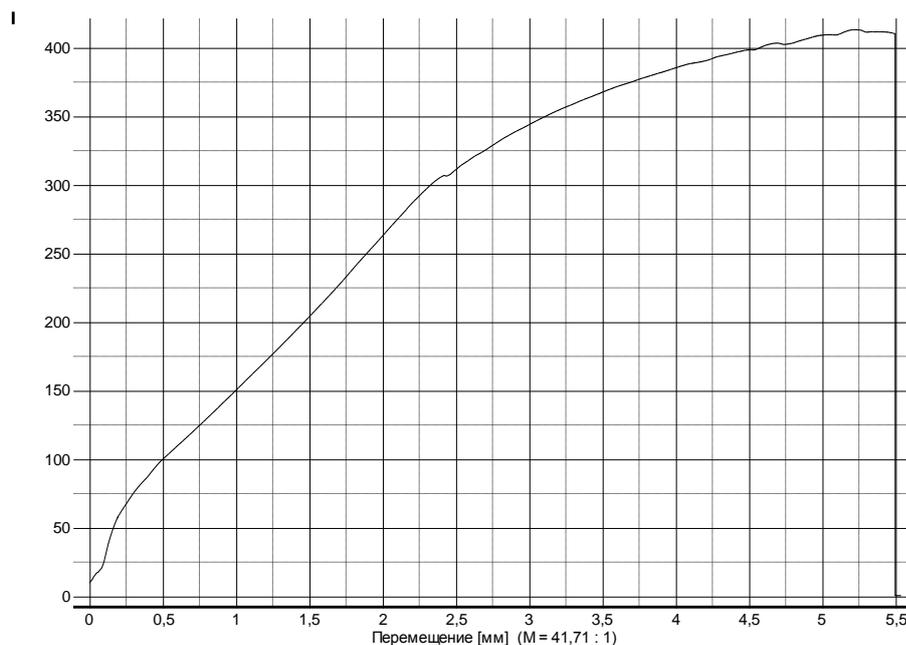


Рисунок 20. Кривая разрушения сварного шва при высоких частотах вращения инструмента

На кривой также практически отсутствует участок пластической деформации. А разрушающее напряжение составляет 415 МПа.

Результаты испытаний в виде зависимостей механических характеристик образцов в зависимости от частоты оборотов инструмента приведены на рисунках 21÷26.

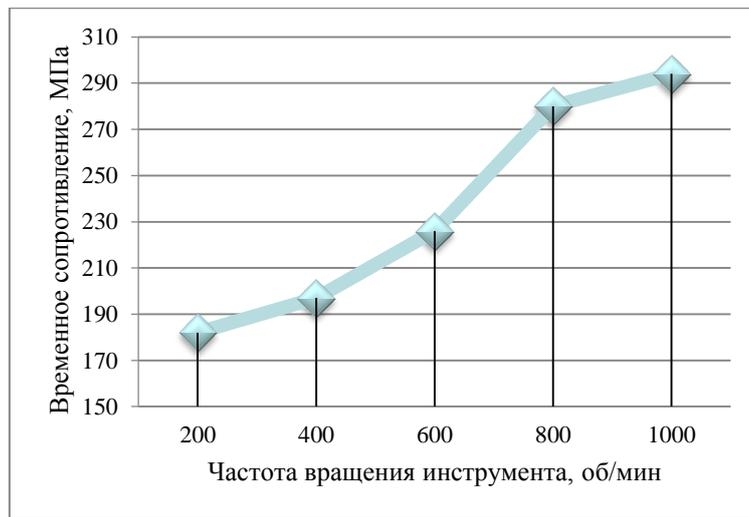


Рисунок 21. Временное сопротивление при разрыве

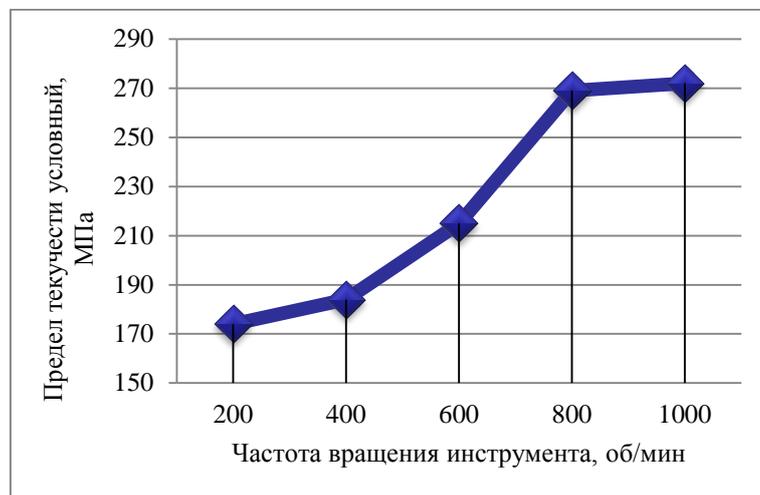


Рисунок 22. Условный предел текучести

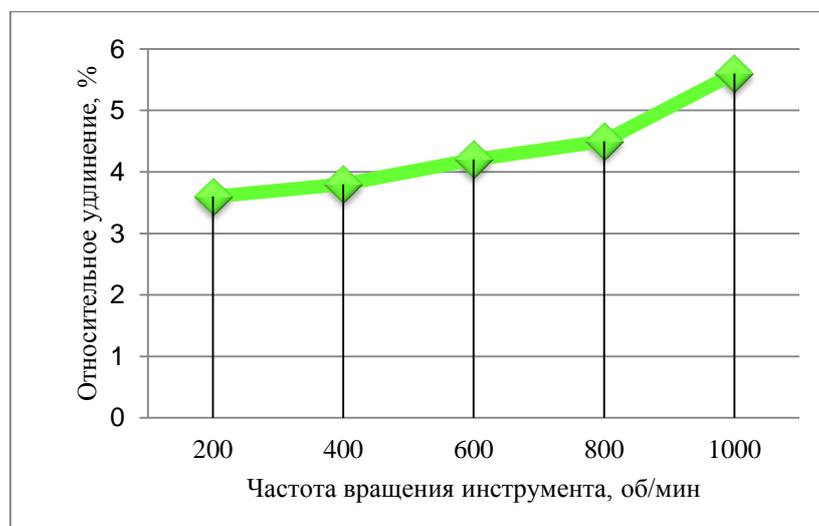


Рисунок 23. Относительное удлинение при разрыве

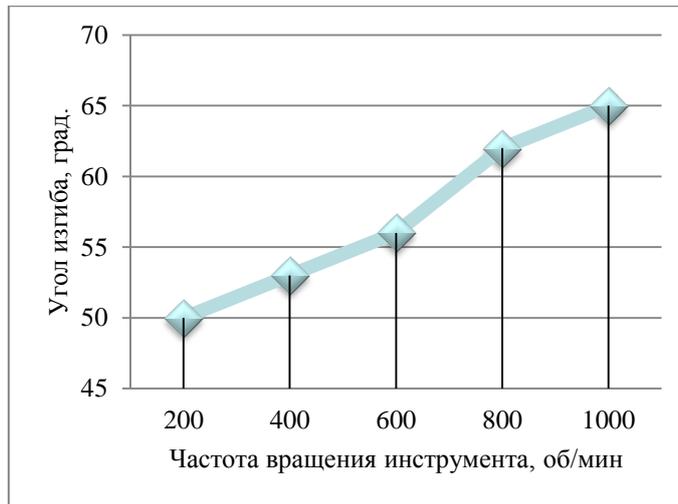


Рисунок 24. Угол изгиба

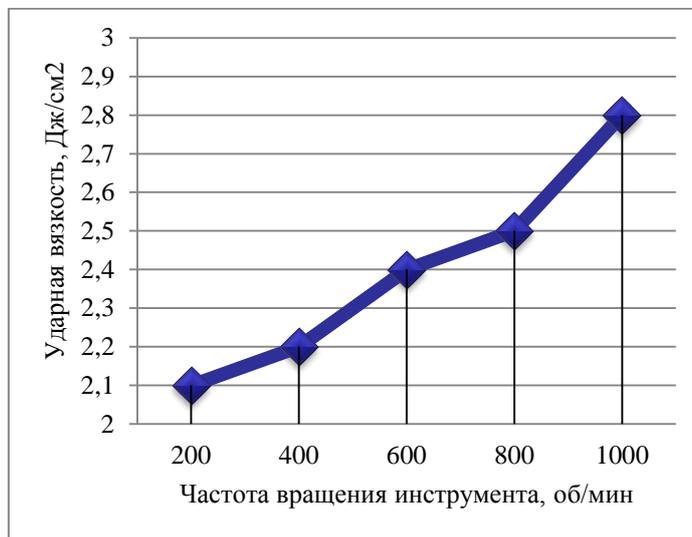


Рисунок 25. Ударная вязкость

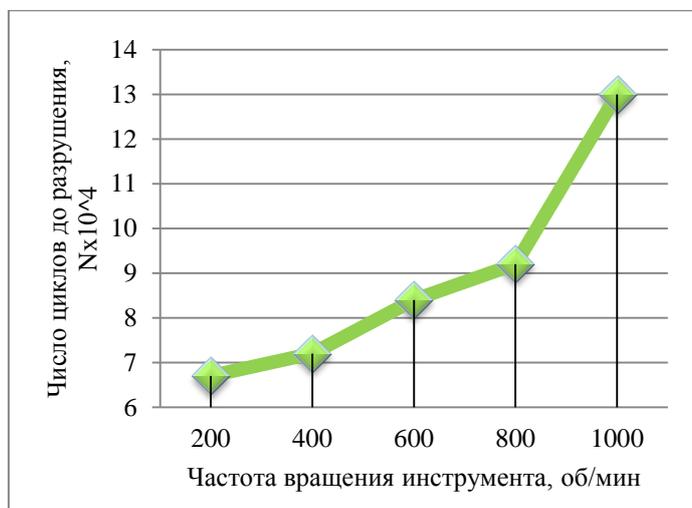


Рисунок 26. Число циклов до разрушения

### 3.2 Результаты исследования структурных характеристик

Характерное изображение макроструктуры сварного соединения, полученного при низких частотах вращения инструмента, в поперечном сечении, приведено на рисунке 23. Структурных дефектов не наблюдается. Явно выделяется зона интенсивного термомеханического воздействия, образующая ядро шва и зона термомеханического воздействия, образующая околошовную зону. Ядро шва имеет макроструктуру в виде луковых колец, что свидетельствует о недостаточной температуре перемешивания при данном режиме сварки. В околошовной зоне наблюдаются следы от инструмента.

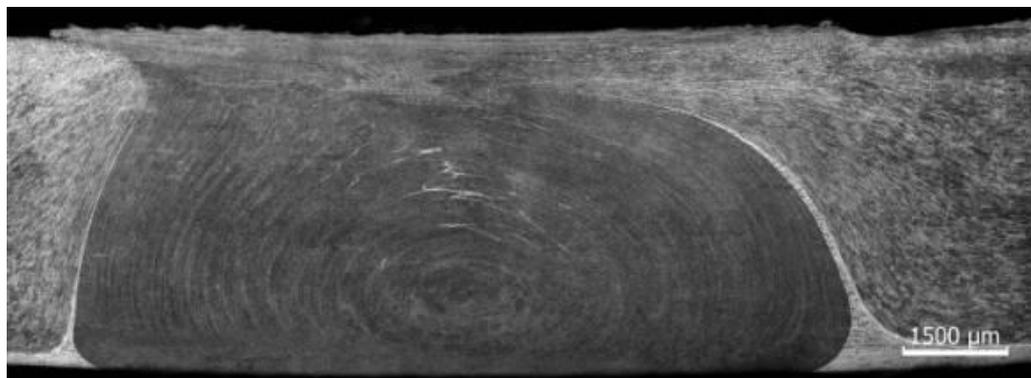


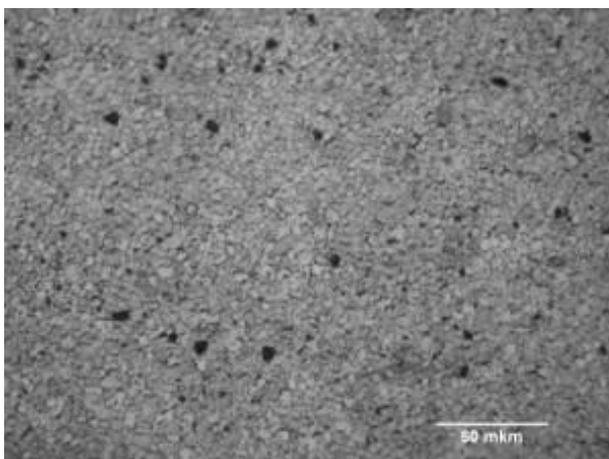
Рисунок 23. Изображение макроструктуры шва, полученного при низких частотах вращения инструмента.

На рисунке 24 приведено изображение макроструктуры шва, полученного при высоких частотах вращения инструмента. В отличие от предыдущего изображения, в структуре не видны луковые кольца, однако можно заметить признаки структурных рекристаллизационных превращений, что свидетельствует о высокой температуре процесса сварки.

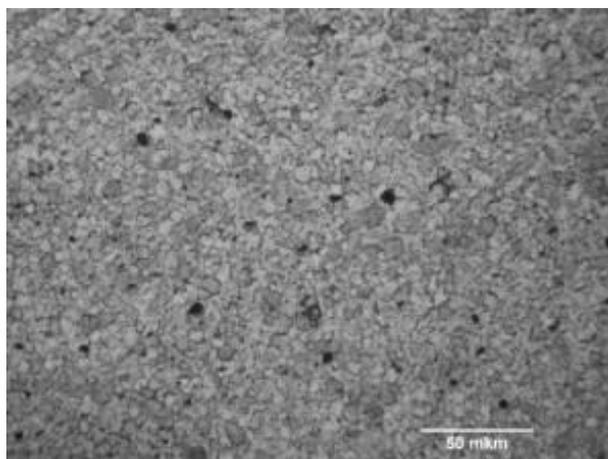


Рисунок 24. Изображение микроструктуры шва, полученного при высоких частотах вращения инструмента.

Оценка наличия пережогов необходима выявления локальных повышенных температур в зоне шва и околошовной зоне, так как повышенная температура приводит к появлению эвтектических образований и, как следствие, к снижению прочностных характеристик сварного соединения. Следы пережогов на шлифах образцов отсутствуют. Это означает, что температура сварки в указанном диапазоне режимов не приводит к перегреву металла, деградации его структуры и снижению прочностных характеристик. В выбранном диапазоне частот вращения рабочего инструмента структурные несплошности наблюдаются при частоте вращения 200 об/мин, что связано с недостаточным перемешиванием материала в зоне шва. Характеристические изображения микроструктур полученных сварных соединений приведены на рисунке 25.



а



б

Рисунок 25. Микроструктура зоны перемешивания сварного соединения: а - полученного при низких частотах вращения инструмента; б - а - полученного при высоких частотах вращения инструмента

На рисунке видно, что размер зерен у образцов с низкой частотой вращения инструмента меньше, чем у образцов с высокой частотой вращения инструмента. Методом подсчета пересечений был измерен средний размер зерен в зоне перемешивания. Соотношение размеров зерен, соответственно, составляет 3,8/5,7 мкм.

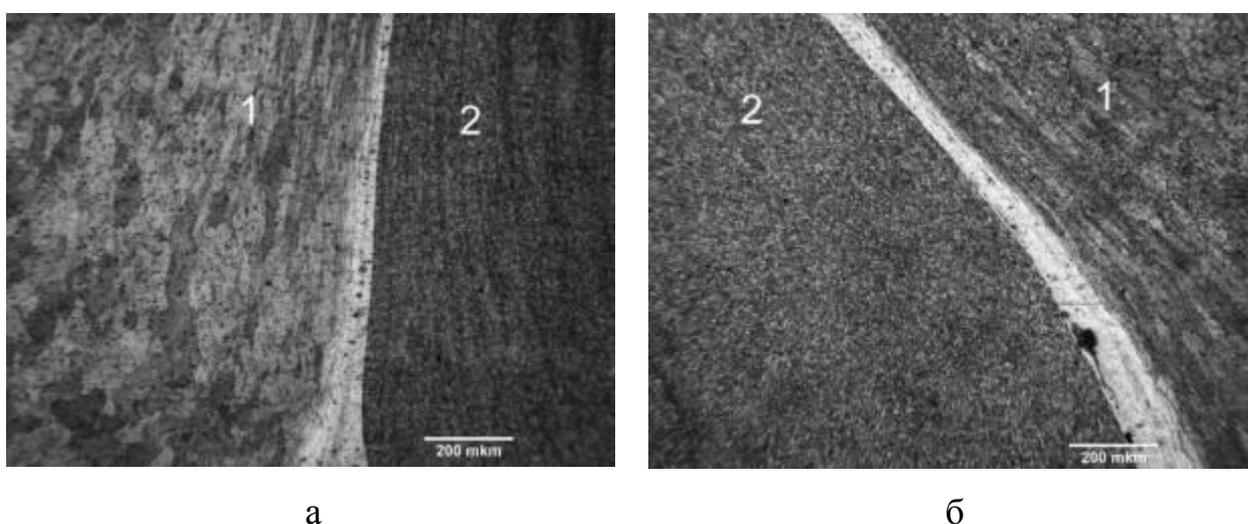


Рисунок 26 – Микрофотографии микроструктур на границе между зоной термомеханического влияния и зоной перемешивания: 1 — зона термомеханического влияния; 2 — зона перемешивания. Скорость вращения сварочного инструмента: 200 (а); 800 об/мин (б)

Меньший размер зерна в сварном соединении, полученном при низких частотах вращения инструмента, объясняется малым тепловыделением в процессе сварки, что замедляет процесс структурного рекристаллизационного превращения. В случаях с высокой частотой вращения инструмента тепловыделение повышенное, что приводит к рекристаллизации и росту зерна. В околошовной зоне (рисунок 26)

наблюдается незначительная фрагментация и переориентация зеренной структуры в сторону лицевой поверхности шва.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4АМ61	Сулеймен Гулжайна Бериккызы

<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОМ</b>
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	15.04.01 Машиностроение

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	– стоимость расходных материалов; – норматив заработной платы; – стоимость расхода электроэнергии.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	– коэффициенты для расчета заработной платы; – тариф на электроэнергию.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	– отчисления во внебюджетные фонды; – расчёт дополнительной заработной платы

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Анализ конкурентных технических решений. Потенциальные потребители результатов исследования. Выполнение SWOT-анализа проекта.
2. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Определение трудоемкости выполнения работ. Разработка графика проведения научного исследования. Расчет материальных затрат НТИ. Основная заработная плата исполнителей темы. Отчисления на социальные нужды. Формирование бюджета затрат научно – исследовательского проекта.

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Календарный график проведения исследования в виде диаграммы Ганта
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Матрица SWOT
5. График проведения и бюджет НТИ

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Старикова Е.В.	к.ф.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4АМ61	Сулеймен Г.Б.		

#### **4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Целью данного раздела работы является технико-экономическое обоснование научно-исследовательских работ (НИР). Оно проводится с целью определения и анализа трудовых и денежных затрат, направленных на реализацию НИР, а также уровня научно-технической результативности НИР. Рамки данной работы НИР включают в себя исследование влияния режимов сварки трением с перемешиванием на качество получаемого сварного шва.

##### **4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

В последнее время в промышленно развитых странах возрастает интерес процессу сварки трением с перемешиванием. В этих странах интенсивно идет развитие в отраслях авиационной и космической техники, вагоностроении, судостроении и во всех других отраслях машиностроения, где значительное место занимает ответственные сложные конструкции и интегрированные детали, материалы которых обладают высокими эксплуатационными характеристиками. И к числу наиболее проблемных вопросов относится соединение материалов. Основываясь на показатели предыдущих практик, можно сказать, что сварка является одним из самых надежных и прогрессивных технологических методов получения неразъемного соединения.

Особый интерес для соединения представляет способ сварки трением с перемешиванием, который является единственным способом соединения, реализуемый в твердой фазе без расплавления металла. Результаты непрерывного совершенствования технологии, оборудования и инструмента обеспечили воспроизводимость качества и высокие механические характеристики соединений, полученных данным методом.

Результаты моей научно-исследовательской работы предназначены для промышленности, а именно для изделий новых поколений авиационно-

космической и ракетной техники, а так же судостроении и машиностроении. Границей рынка может быть как вся Россия, так и другие страны мира. Технологический процесс сварки трением с перемешиванием применяется скорее крупными производствами, где главными критериями сегментирования являются спрос и отрасли промышленности (выбираются два наиболее значимых для рынка). В связи с этим строится карта сегментирования рынка (таблица 3).

Таблица 3. Карта сегментирования рынка

		Отрасль промышленности				
		Авиация	Космическая, ракетная техника	Судо-строение	Вагоно-строение	Автомобиле-строение
Спрос	Низкий	-	-	-	-	-
	Средний	-	-	-	-	+
	Высокий	+	+	+	+	-

По данной таблице можно сказать, что высокий спрос на данный технологический процесс может быть в различных областях промышленности.

Видно, что сегмент рынка нашего метода СТП – это промышленно-производственные компании, которые работают с ответственными сложными конструкциями и интегрированными деталями, материалы которых обладают высокими эксплуатационными характеристиками. Например, производство высокоскоростных железнодорожных вагонов, самолетов, ракет, кораблей и т.п.

#### 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

В данном исследовании конкурирующими методами являются все методы сварки. Однако, так как тема посвящена исследованию влияния

режима сварки трением с перемешиванием на качество сварного шва сплава алюминия, материал которого является трудносвариваемым, можно сузить круг конкурирующих способов. В связи с трудносвариваемостью материала, как конкурентов рассматриваем наиболее распространенные процессы сварки алюминия такие, как аргодуговая TIG сварка и импульсная полуавтоматическая MIG сварка.

Аргодуговая TIG сварка - аргонная, аргоновая или сварка аргоном – процесс сварки неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона. Данный метод требует наличия аппарата для аргонной сварки - переменного тока и бесконтактного высокочастотного зажигания дуги.

Полуавтоматическая MIG сварка алюминия аналогична процессу MIG сварки стали. В данном способе сварки также применяется подача сварочной проволоки и защитного газа через сварочную горелку. В связи с высокой теплопроводностью алюминия потребуется больше контролировать мощность дуги и скорость подачи проволоки.

Раньше считалось, что качественный сварной шов алюминия можно получить только при помощи аргодуговой TIG сварки. Однако при правильном выборе и использовании оборудования и соответствующих технологий полуавтоматической MIG сварки можно добиться качественного шва, значительно увеличивая при этом производительность.

Для сравнения затрат на производство взяли метод полуавтоматической MIG сварки. Результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Затраты на производство при использовании методов СТП и MIG

Категория	метод СТП	метод MIG
Время сварки, мин	2:25	7:22
Время на установку и закрепление в сборочном приспособлении, мин	8:05	3:11
Удаление оксидной пленки, мин	0	6:14

Защита работника, мин	0	2:00
Общее время на подготовку к сварке, мин	12:55	24:00
Скорость сварки, мм/мин	2000	750
Капиталовложение, \$	400	200
Длина шва, мм	2000	2000

Из таблицы видно, что производительность процесса СТП почти вдвое увеличивается по сравнению с методом MIG. Отсутствие вспомогательных материалов и низкая потребляемая энергия не только обеспечивает экологическую безопасность, но и производительность получения сварочного шва алюминия.

В таблице 5 приведена оценка конкурентов, где Ф – технологический процесс СТП, к1 – технологический процесс TIG, к2 – технологический процесс MIG.

Таблица 5. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		БФ	Бк1	Бк2	КФ	Кк1	Кк2
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
2. Энергоэкономичность	0,07	5	3	3	0,35	0,21	0,21
3. Удобство в эксплуатации	0,05	4	3	3	0,2	0,15	0,15
4. Шероховатость сварного шва	0,05	4	3	4	0,2	0,15	0,2
5. Прочность сварного шва	0,1	5	4	5	0,5	0,4	0,5
6. Потребность вспомогательных материалов	0,05	3	5	4	0,15	0,25	0,2
7. Возможность автоматизации	0,07	5	3	4	0,35	0,21	0,28
8. Стандартизированность процесса	0,05	3	4	4	0,15	0,2	0,2
9. Безопасность	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
10. Квалификация пользователя	0,07	3	4	4	0,35	0,21	0,28
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность	0,07	4	4	4	0,28	0,28	0,28
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	3	4	4	0,15	0,2	0,2

3. Цена	0,07	4	3	5	0,28	0,21	0,35
4. Наличие сертификации	0,05	3	4	4	0,2	0,2	0,2
5. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
<b>Итого Σ</b>	<b>1</b>	<b>63</b>	<b>54</b>	<b>60</b>	<b>4,36</b>	<b>3,57</b>	<b>4,05</b>

Исходя из таблицы 5 видно, что такие критерии как производительность, энергоэкономичность, автоматизированность, потребность вспомогательных материалов выше, чем у конкурентов, тем самым технологический процесс сварки трением с перемешиванием, является более перспективным. Преимуществом конкурентов перед СТП являются уровень проникновения на рынок, стандартизованность и наличие сертификации.

#### 4.1.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ – это выявление сильных (S – strenght) и слабых (W – weaknness) сторон исследуемого объекта, что описывает внутреннюю среду, а также возможностей (O – opportunities) и угроз (T – troubles) внешней среды. SWOT-анализ дает возможность принимать любые управленческие решения.

Таблица 6. Матрица SWOT

	<p><b>Сильные стороны (S):</b>  <b>С1:</b> Экологическая безвредность технологии процесса сварки  <b>С2:</b> Отсутствие вспомогательных материалов  <b>С3:</b> Низкая потребная энергия  <b>С4:</b> Экономическая эффективность  <b>С5:</b> Высокая производительность</p>	<p><b>Слабые стороны (W):</b>  <b>Сл1:</b> Отсутствие стандартов и норм на данный метод  <b>Сл2:</b> Отсутствие универсального инструмента для всех материалов и сплавов  <b>Сл3:</b> Необходимость жесткой фиксации свариваемых кромок на опорной подкладке  <b>Сл4:</b> Образование в конце шва отверстия</p>
--	--	---

	<b>С6:</b> Стабильное высокое качество получаемых сварных швов, материалы которых трудносвариваемы или несвариваемы	
<b>Возможности (О):</b> <b>В1:</b> Возможность легкой автоматизации <b>В2:</b> Повышение спроса на данную технологию <b>В3:</b> Использование инновационной инфраструктуры ТПУ <b>В4:</b> Податливость математическому моделированию	Используя полученные результаты исследования можно получить оптимальный режим сварки, при котором будет обеспечено высокое качество сварного шва.	Результаты исследования могут послужить полезной информацией при использовании данного метода в производстве.
<b>Угрозы (Т):</b> <b>У1:</b> Присутствие зарубежных конкурентов на рынке <b>У2:</b> Слабое и несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства <b>У3:</b> Отсутствие мотивации (в том числе и материальной) к дальнейшему развитию <b>У4:</b> Отсутствие спроса на данную технологию <b>У5:</b> Появление новых инновационных технологий	Большой процент от общего объема рынка приходится на долю зарубежных производителей.	Отсутствие утвержденных стандартов и актов, что уменьшает спрос на рынке

На основе SWOT-анализа можно сделать выводы, что данная научно-исследовательская работа перспективна. Рассматриваемая технология позволит улучшить качество и снизить временные и финансовые затраты. Для преодоления угроз необходимо проводить дальнейшие исследования в

данной области с целью повышения точности и нормированности данного метода. Также немаловажную роль сыграет получение дополнительного финансирования, которое позволит увеличить мотивацию для дальнейшего усовершенствования технологии процесса СТП и дает возможность полностью сфокусироваться на полное освоение данной технологии. И это в свою очередь выведет данный метод на рынок, где она создаст высокую конкуренцию другим зарубежным производителям.

## 4.2. Планирование управления научно-техническим проектом

### 4.2.1 Иерархическая структура работ в рамках научного исследования

ИСР (иерархическая структура работы) – это разбиение (декомпозиция) целей проекта на более мелкие компоненты, которые затем используются командой проекта для достижения целей проекта. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта.

Иерархическая структура моей научной структуры представлена на рисунке 27.



## Рисунок 27. Иерархическая структура работы

Научно-исследовательские работы и опытно-конструкторские разработки разбиваются на этапы в соответствии с ГОСТ 15.101-98, (для НИР) ГОСТ Р 15.201-2000 (для ОКР). В зависимости от характера и сложности НИОКР ГОСТ допускает разделение этапов на отдельные виды работ.

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав, которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 7.

Таблица 7. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Поиск и изучение материалов	Студент
	3	Выбор направления исследований	Руководитель, студент
	4	Календарное планирование работ	Руководитель

Теоретическая часть	5	Поиск и изучение литературы	Студент
	6	Составление предварительного литературного обзора	Студент
	7	Анализ других методов сварки	Студент
	8	Оценка правильности полученных результатов	Руководитель
	9	Корректировка	Студент
Экспериментальная часть	10	Подготовка и проведение сварочных образцов	Руководитель, студент
	11	Проведение испытаний на растяжение	Руководитель, студент
	12	Проведение исследований микро и макроструктуры образцов	Руководитель, студент
	13	Анализ полученных результатов	Руководитель, студент
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ВКР)	14	Составление пояснительной записки	Студент
	15	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, студент
	16	Подготовка презентации и доклада	Руководитель, студент

#### 4.2.2 Определение трудоёмкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаях образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования. Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется следующая формула (4.1):

$$t_{ожі} = \frac{3t_{min_i} + 2t_{max_i}}{5}, \quad (4.1)$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоёмкость выполнения  $i$ -ой работы чел/дн.;  $t_{mini}$  – минимально возможная трудоёмкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел/дн.;  $t_{maxi}$  – максимально возможная трудоёмкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел/дн.

Исходя из ожидаемой трудоёмкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $Tr$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$Tr_i = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (4.2)$$

где  $Tr_i$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоёмкость выполнения одной работы, чел/дн.;  $Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

#### 4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ [24].

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой (4.3):

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (4.3)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;  $T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;  $k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле (4.4):

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (4.4)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;  $T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;  $T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году. Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе  $T_{ki}$  необходимо округлить до целого числа.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 118 - 14} = 1,56$$

Все рассчитанные значения необходимо свести в таблицу (таблица 8).

Таблица 8. Временные показатели проведения научного исследования (Р – научный руководитель; С – студент)

Наименование работы	Трудоемкость			Должность	Длительность в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность в календарных днях $T_{ki}$
	$t_{\text{min}}$ ч/дни	$t_{\text{max}}$ ч/дни	$t_{\text{ожі}}$ ч/дни			
1. Составление и утверждение технического задания	1	3	1,8	Р	1,8	3
2. Поиск и изучение материалов	4	7	5,2	С	5,2	8
3. Выбор направления исследований	1	2	1,4	Р, С	0,7	1
4. Календарное планирование работ	1	6	3	Р	3	5
5. Поиск и изучение литературы	7	10	8,2	С	8,2	13

6. Составление предварительного литературного обзора	4	7	5,2	С	5,2	8
7. Анализ других методов сварки	1	2	1,4	С	1,4	2
8. Оценка правильности полученных результатов	2	4	2,8	Р	2,8	4
9. Корректировка	1	2	1,4	С	1,4	2
10. Подготовка и проведение сварочных образцов	2	3	2,4	Р, С	1,2	2
11. Проведение испытаний на растяжение	2	5	3,2	Р, С	1,6	3
12. Проведение исследований микро и макроструктуры образцов	2	5	3,2	Р, С	1,6	3
13. Анализ полученных результатов	5	7	5,8	Р, С	2,9	5
14. Составление пояснительной записки	7	10	8,2	С	8,2	13
15. Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	1	2	1,4	Р, С	0,7	1
16. Подготовка презентации и доклада	2	4	2,8	Р, С	1,4	2
Итоговая сумма $\Sigma$	43	79	57,4		47,3	74

На основе таблицы 6 выше строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работы в рамках научно-исследовательского проекта и представлен в таблице 9 с разбивкой по месяцам и неделям за период времени выполнения исследовательской работы.

Таблица 9. Календарный план-график

Наименование работы	Должность	Т <sub>пл</sub>	Продолжительность выполнения работ												
			02.18		03.18			04.18			05.18			06.18	
			3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	

1. Составление и утверждение технического задания	Р	3				
2. Поиск и изучение материалов	С	8				
3. Выбор направления исследований	Р, С	1				
4. Календарное планирование работ	Р	5				
5. Поиск и изучение литературы	С	13				
6. Составление предварительного литературного обзора	С	8				
7. Анализ других методов сварки	С	2				
8. Оценка правильности полученных результатов	Р	4				
9. Корректировка	С	2				
10. Подготовка и проведение сварочных образцов	Р, С	2				
11. Проведение испытаний на растяжение	Р, С	3				
12. Проведение исследований микро и макроструктуры образцов	Р, С	3				
13. Анализ полученных результатов	Р, С	5				

14. Составление пояснительной записки	С	13			
15. Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Р,С	1			
16. Подготовка презентации и доклада	Р,С	2			

Проделанная работа была равномерно распределена в течение времени, выделенного для выполнения ВКР. Из календарного плана-графика видно, что наибольшее время было выделено для поиска и изучение литературы и на составление пояснительной записки.

### **4.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)**

#### **4.3.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)**

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода. Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в таблицу 10.

Таблица 10. Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

№	Материал	Единица материала	Цена, руб/ед.	Кол-во материала	Затраты, руб.
1	Листовой прокат Д16Т	кг	362	30	10860
2	Алмазная паста зернистости АСМ 1/0 ВОМ	50 гр	110	1	110
3	Азотная кислота	л	950	1	950
4	Соляная кислота	л	50	1	50
5	Фтористоводородная кислота	л	200	1	200
6	Дистиллированная вода	л	55	1	55
Итого Σ					12225

#### **4.3.2 Специальное оборудование для проведения экспериментальных работ**

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стенов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

Таблица 11. Список оборудования для исследования

№	Наименование оборудования	Количество
1	Стенд экспериментальных исследований режимов СТП	1
2	Машина для испытания конструкционных материалов УТС 110М-100	1
3	Копер маятниковый 2130 КМ-0,3	1
4	Микрометр МК 211221	1

Вышеуказанное спецоборудование для научных работ были в лаборатории. Для оборудования не было финансовых расходов.

### 4.3.3 Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда). Расчет основной заработной платы сводится в таблице 12.

Таблица 12. Расчет основной заработной платы

№	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Зарплата, приходящаяся на один чел.-дн., руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), руб.
1	Руководитель	69	337	23250
2	Студент	126		-
Итого $\Sigma$				23250

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} = 96590,34 \quad (1)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;  $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата. Основная заработная плата руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб} = 87809,4 \quad (2)$$

где  $T_{раб}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн.;  $Z_{дн}$  – средневзвешенная заработная плата работника, руб.

Средневзвешенная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = (Z_{\text{м}} \cdot M) / F_{\text{д}} = 1272,6 \quad (3)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб (в качестве месячного оклада студента выступает стипендия, которая составляет 2600руб);  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 48 раб. дней  $M=10,4$  месяца, 6-дневная неделя);  $F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно- технического персонала (в рабочих днях). Баланс рабочего времени представлен в таблице 13.

Таблица 13. Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
-выходные дни	56	104
-праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
-отпуск	48	24
-невыходы по болезни	-	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	247	223

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot k_{\text{р}} = 30225 \text{ руб}, \quad (4)$$

где  $Z_{\text{б}}$  – базовый оклад, руб;  $k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равный 1,3. Результаты расчета основной заработной платы представлены в таблице 14.

Таблица 14. Расчёт основной заработной платы

№	Исполнитель	$Z_{\text{б}}$ , руб.	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$ , руб	$Z_{\text{дн}}$ , руб.	$T_{\text{раб}}$ раб.дн.	$Z_{\text{осн}}$ , руб.
1	Руководитель	23250	1.3	30225	1272,6	69	87809,4
2	Студент	-	-	2600	-	-	-

#### 4.3.4 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время (очередной и учебный отпуск, выполнение государственных обязанностей, выплата вознаграждений за выслугу лет и т.п.) и рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (5)$$

где  $Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата, руб.;  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной зарплаты ( $k_{\text{доп}} = 0,1$ );  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата, руб. В таблице 15 приведен расчёт основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 15 – Заработная плата исполнителей НИР

Заработная плата	Руководитель	Студент
Основная зарплата	87809,4	2600
Дополнительная зарплата	8780,94	-
Зарплата исполнителя	96590,34	2600
Итого по статье $C_{\text{зп}}$ , руб	99190,34	

#### 4.3.5 Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,3 \cdot 96590,34 = 28977,102 \text{ руб.} \quad (6)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

#### 4.3.6 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70 - 90 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации. Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,8 \cdot 96590,34 = 77272,27 \text{ руб.} \quad (7)$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов.

Таблица 16 – Группировка затрат по статьям

№	Статьи затрат	Сумма, руб.
1	Материальные затраты	12225
2	Затраты на интернет	1400
3	Затраты на оплату труда	99190,34
4	Отчисления на социальные нужды	28977,102
5	Накладные расходы	77272,27
6	Прочие расходы (2% от полной зарплаты)	19318,068
	Полная себестоимость НИР	238382,8

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4АМ61	Сулеймен Гулжайна Бериккызы

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	15.04.01 Машиностроение

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

*Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения*

*Исследование влияния параметров процесса сварки трением с перемешиванием на качество сварных соединений сплава Д16Т.  
Рабочая зона – лаборатория контроля качества материалов и конструкций ИФПМ СО РАН.*

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

#### **1. Производственная безопасность**

*1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:*

- физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;
- действие фактора на организм человека;
- приведение допустимых норм с необходимой размерностью;
- предлагаемые средства защиты.

*1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:*

- механические опасности;
- термические опасности;
- электробезопасность.

*1) Воздействие электрического тока при возникновении утечки на корпус и землю - проверка целостности изоляции и токоведущих частей электрооборудования перед началом работ;*

*2) Воздействие ультразвука и шума на органы слуха - выполнение персоналом требований инструкции по охране труда при проведении сварочных работ на стенде, использование средств индивидуальной защиты (наушники по ГОСТ Р 12.4.208-99);*

*3) Воздействие химических веществ на кожу и верхние дыхательные пути - выполнение работ при включенной вентиляции, использование средств индивидуальной защиты при подготовке кромок сварного шва (респиратор по ГОСТ 12.4.028, перчатки защитные по ГОСТ 12.4.171-86);*

#### **2. Экологическая безопасность:**

- защита селитебной зоны
- анализ воздействия объекта на атмосферу;
- анализ воздействия объекта на гидросферу;
- анализ воздействия объекта на литосферу;
- разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.

*Технологический процесс сварки трением с перемешиванием не оказывает вреда на окружающую среду.*

*Отходы производства в виде стружки и обрезков листовых материалов подлежат утилизации согласно СНиП 2.01.08-85.*

#### **3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:**

- перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;
- выбор наиболее типичной ЧС;
- разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;
- разработка действий в результате возникшей ЧС и

*Типичная ЧС – возникновение пожара, так как используется электрическое оборудование.*

*При работе с оборудованием необходимо придерживаться ТБ основанной на Тои Р-45-068-97.*

*Лаборатория оснащена средствами*

<i>мер по ликвидации её последствий.</i>	<i>электрической пожарной сигнализации и пожаротушения.</i>
<b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<i>Требования к средствам коллективной и индивидуальной защиты работающих установлены в ГОСТ 12.4.011.</i> <i>Расположение и организация рабочих мест для безопасного выполнения технологических операций должны соответствовать по ГОСТ 12.2.003.</i> <i>Требования электробезопасности - по ГОСТ 12.2.007.0.</i> <i>Требования к защите от шума - по ГОСТ 12.1.003.</i> <i>Требования к средствам защиты рук - по ГОСТ 12.4.020.</i>
<i>5. Перечень расчетного и графического материала</i>	<i>Расчет вентиляции помещения.</i>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Раденков Т.А.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ61	Сулеймен Г.Б.		

## **5. Социальная ответственность**

### **5.1. Производственная безопасность**

В последние годы процесс сварки трением с перемешиванием применяется в таких ответственных, требующих вмешательства НИОКР, как судостроение, вагоностроение, автомобилестроение, ракетно-космическая и авиационная отрасли. Список крупных компаний и организаций, применяющих процесс сварки трением с перемешиванием, непрерывно растет, среди которых можно отметить Boeing, Airbus, Eclipse Aviation Corporation, NASA, ВМС США, Mitsubishi, Kawasaki, Alstom LHB GmbH, а также другие промышленные предприятия в США, Европе, Китае и Японии.

Актуальность работы заключается в том, что метод сварки трением с перемешиванием дает возможность получать соединения трудносвариваемых материалов в ответственных и сложных по конструкции деталях. Однако так как сварка трением перемешиванием является сравнительно новым способом соединения материалов, анализ опубликованных результатов исследований процесса СТП и свойств соединений алюминиевых сплавов разных групп легирования подтверждает необходимость разработки для каждого из сплавов параметров режима сварки, соответствующих его термомеханическим характеристикам.

Целью работы является анализ распространенных методов сварки трением, исследование влияния параметров процесса сварки трением с перемешиванием на качество сварных соединений сплава Д16Т.

#### **5.1.1. Анализ производственных факторов, возникающих при проведении исследований**

В данной научной работе для исследования качества сварных швов были получены экспериментальные образцы на специально разработанном

автоматизированном стенде. Виды опасных факторов при выполнении технологического процесса СТП, а также содержание мер по предупреждению опасных ситуаций приведены в таблице 17.

Таблица 17 — Опасные факторы и меры их предупреждения

Источник опасности	Опасный фактор	Меры предупреждения опасной ситуации
Электрические	1) Воздействие электрического тока при возникновении утечки на корпус	Проверка целостности изоляции и токоведущих частей электрооборудования перед началом работ
	2) Воздействие электрического тока при возникновении утечки на землю	Проверка наличия и целостности заземления электрооборудования перед началом работ
Излучение	1) Воздействие ультразвука на органы слуха 2) Воздействие шума на органы слуха	Выполнение персоналом требований инструкции по охране труда при проведении сварочных работ на стенде. Использование средств индивидуальной защиты (наушники по ГОСТ Р 12.4.208-99)
Химические	1) Воздействие химических веществ на кожу и верхние дыхательные пути	Выполнение персоналом требований инструкции по охране труда при проведении сварочных работ на стенде. Выполнение работ при включенной вентиляции. Использование средств индивидуальной защиты при подготовке кромок сварного шва (респиратор по ГОСТ 12.4.028, перчатки защитные по ГОСТ 12.4.171-86)

Источник опасности	Опасный фактор	Меры предупреждения опасной ситуации
Тепловые	1)Термический ожог при контакте с нагретыми деталями сварочного стенда, сварочным инструментом, нагретым экспериментальным образцом неразъемного соединения	Выполнение персоналом требований инструкции по охране труда при проведении сварочных работ на стенде. Использование средств индивидуальной защиты рук (перчатки защитные по ГОСТ EN 407-2012)
Механические	1)Порезы при контакте с острыми кромками листовых заготовок	Выполнение персоналом требований инструкции по охране труда при проведении сварочных работ на стенде. Использование средств индивидуальной защиты рук (перчатки защитные по ГОСТ Р EN 388-2009)
	2)Попадание в глаза стружки, абразива	Выполнение персоналом требований инструкции по охране труда при проведении подготовки. Использование средств индивидуальной защиты рук (перчатки защитные по ГОСТ Р EN 388-2009)

### **5.1.2. Меры для защиты исследователя от воздействия опасных и вредных факторов**

Выбор методов и средств обеспечения безопасности должен осуществляться на основе выявления факторов, присущих тому или иному производственному оборудованию или технологическому процессу.

Перед допуском к проведению операций, выполняемых при проведении технологического процесса получения неразъемных соединений, лица, участвующие в его выполнении, проходят инструктаж по безопасным приемам выполнения работ с регистрацией в журнале по установленной форме. Инструктаж должен производиться периодически в сроки, установленные приказом по организации.

К работам по проведению технологических операций при проведении технологического процесса допускаются лица, имеющие квалификационную группу не ниже III по электробезопасности для работы с электроустановками напряжением до 1000 В.

Перед началом рабочей смены, после включения сварочного станда, стола механической обработки проводится контроль технического состояния оборудования.

Проверка технического состояния включает в себя:

- ежедневный осмотр и проверку технического состояния ;
- устранение неисправностей.

При осмотре и проверке технического состояния оборудования сварочного станда и стола механической обработки следует провести:

- осмотр наружных поверхностей и проверку отсутствия следов коррозии и других повреждений;
- визуальный осмотр наружных поверхностей и их очистку от загрязнений;
- проверку исправности заземления;
- проверку исправности ламп подсветки, замену ламп (при необходимости);
- визуальный осмотр целостности кабелей питания и управления;
- проверку работоспособности приводов сварочного станда;
- проверку работоспособности управляющего компьютера сварочного станда;

- проверку работоспособности двигателей охладителей рабочего стола и шпинделя инструмента;
- проверку работоспособности ультразвукового оборудования, включая УЗ-инструмент и охладитель;
- проверку целостности, степени износа и остроты режущего инструмента: фрезы для подготовки кромок сварного шва; пильного диска для вырезки листовых заготовок; сверла для сверления листовых заготовок, их заточку и замену (при необходимости).

Во время осмотра оборудования запрещается:

- производить какие-либо органами управления;
- прикасаться к токоведущим частям и производить их чистку;

При обнаружении неисправности обслуживающий персонал обязан отключить оборудование и принять меры к немедленному устранению обнаруженных неисправностей.

### **5.1.3. Расчет вентиляции**

На участке механической обработки и сварки применяем общеобменную приточно-вытяжную вентиляцию. Вентиляция достигается удалением загрязненного или нагретого воздуха из помещения и подачей в него свежего воздуха [1].

На участке механической обработки и сварки применяем общеобменную приточно-вытяжную вентиляцию и местную вытяжную вентиляцию.

Каждое рабочее место также оборудуется вытяжным отсосом – зонтом, открытой конструкцией, всасывающее отверстие которой, приближено к источнику выделений. Подвижность воздуха в зоне сварки должна быть 0,2-0,5 метров в секунду.

Определим необходимый объём воздуха  $L$ , удаляемый от местных отсосов по формуле [2]:

$$L=3600 \cdot F \cdot V, \quad (5.1)$$

где  $F$  – суммарная площадь рабочих проёмов и неплотностей,  $\text{м}^2$ ;

$V$  – скорость всасывания воздуха на рабочем участке,  $V = 0,5 \text{ м/с}$ ;

$$L = 3600 \cdot 0,36 \cdot 0,5 = 648 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Из расчета видно, что объём воздуха удаляемый от местных отсосов составляет  $L= 648 \text{ м}^3/\text{с}$ .

В результате проведенных расчетов выбираем вентилятор радиальный FUK – 2700 SP с двигателем типа АИР 80В2У3, мощностью 2,2 кВт.

## **5.2. Экологическая безопасность**

### **5.2.1. Анализ влияния технологического процесса СТП на окружающую среду**

Технологический процесс сварки трением с перемешиванием не оказывает вреда на гидросферу и атмосферу, однако вспомогательные и дополнительные материалы, применяющиеся при подготовке к сварке, при неправильной организации утилизации могут привести в той или иной степени вредность. Доля материала, проникающая в окружающую среду, не превышает допустимых норм, поэтому нет необходимости в создании санитарной зоны.

Экологическая задача лаборатории заключается в рациональном использовании сырья и электроэнергии, надежном хранении различных

растворов, замене вредных для окружающей среды технологических процессов

Работа по утилизации и захоронению отходов ведется в соответствии с требованиями «Правил охраны окружающей среды от отходов производства и потребления в Российской Федерации». В процессе производства образуется большое количество отходов, которые при соответствующей обработке могут быть вновь использованы как сырье для промышленной продукции. Основными направлениями ликвидации твердых промышленных отходов является вывоз и захоронение на полигонах, сжигание, складирование и хранение на территории предприятия до появления новой технической переработки их в полезный продукт – сырье. Порядок сбора, накопления, транспортировки, утилизации и захоронения отходов регламентируется приказами руководителя предприятия, главного инженера, инструкциями по эксплуатации оборудования.

Использованные растворы кислот собирают в тару, затем нейтрализуют твердыми карбонатами или гидроксидами натрия или калия. Затем жидкость выливают в канализацию с одновременной подачей воды.

### **5.2.2. Меры по снижению вредных воздействий на окружающую среду**

Для обеспечения санитарных норм воздушной среды в производственных помещениях должна использоваться приточная, вытяжная и естественная вентиляция, отопление.

Отходы производства в виде стружки и обрезков листовых материалов подлежат утилизации согласно СНиП 2.01.08-85. На сегодняшний день корпус сотрудничает с компанией «Экорекс», которая организует централизованный сбор и переработку вторичного сырья в Томске и Томской области.

### **5.3. Безопасность в чрезвычайных аварийных ситуациях**

#### **5.3.1. Анализ вероятных ЧС, возникающих при проведении исследований**

В процессе исследования в лаборатории возможны ЧС, так как используется электрическое оборудование и инструменты. Не исключена возможность возникновения пожара. Основной причиной взрывов и пожаров во время научной работы является нарушение правил эксплуатации и техники безопасности при работе с электрическим оборудованием, подключенным к сети. Следовательно, при работе с оборудованием необходимо придерживаться техники безопасности основанной на Тои Р-45-068-97: электроинструменты и электрические машины должны быть безопасными в работе, не иметь доступных для случайного прикосновения токоведущих частей, не иметь повреждений корпусов и изоляции питающих проводов.

К основным видам техники, предназначенной для защиты различных объектов от пожаров, относятся средства сигнализации и пожаротушения. В 7 корпусе предусмотрена электрическая пожарная сигнализация. Она должна быстро и точно сообщать о пожаре с указанием места его возникновения. Сигнализация обеспечивает также автоматический ввод в действие предусмотренных на объекте средств пожаротушения и дымоудаления.

Наиболее широко применяемым средством тушения является вода. Для такого способа тушения предусмотрены пожарные краны. В качестве первичных средств пожаротушения используют огнетушители. В качестве огнетушителей в корпусе распространены огнетушители углекислотные ОУ-5. Преимущества углекислотных огнетушителей: эффективность тушения жидких и газообразных веществ и электроустановок под напряжением до 1000 В; отсутствие следов тушения; диапазон рабочих температур от -40 °С

до +50 °.

При возгорании и пожаре в производственном помещении должна быть произведена аварийная остановка технологического процесса и отключены питающие рубильники.

При необходимости персонал должен быть эвакуирован из производственных помещений.

### **5.3.2. Меры по предотвращению ЧС**

При организации работ по сварке экспериментальных образцов должны соблюдаться требования пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004.

В подразделении, выполняющем технологический процесс получения экспериментальных образцов неразъемных соединений должны быть утверждены инструкции по технике безопасности и пожарной безопасности.

При использовании, размещении, хранении и транспортировке материалов, требуемых для выполнения технологического процесса следует соблюдать требования пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010.

Согласно ГОСТ 12.3.002 для обеспечения безопасности должны быть предусмотрены следующие меры:

- при работе с токсичными веществами применены индивидуальные средства защиты работающих: спецодежда, респиратор, перчатки;
- использование сигнальных знаков и знаков безопасности в соответствии с ГОСТ Р 12.4.026-2001;
- предусмотрено время отдыха с целью предотвращения монотонности, гиподинамики, чрезмерных физических и нервно-психических перегрузок.

## **5.4. Организационно-правовые вопросы обеспечения безопасности**

### **5.4.1. Правовые нормы трудового законодательства**

Правовой основой законодательства в области обеспечения БЖД является Конституция – основной закон государства. Законы и иные правовые акты, принимаемые в РФ, не должны противоречить Конституции РФ. Гарантом Конституции РФ является Президент. Президент РФ издает указы и распоряжения, обязательные для исполнения на всей территории РФ. Федеральные законы принимаются Государственной Думой, рассматриваются Советом Федерации, подписываются и обнародуются Президентом.

Законодательство РФ об охране труда состоит из соответствующих норм Конституции РФ, основ законодательства РФ об охране труда и издаваемых в соответствии с ними законодательных и иных нормативных актов.

Основные направления государственной политики в области охраны труда:

- признание и обеспечение приоритета жизни и здоровья работников по отношению к результатам производственной деятельности предприятий.
- установление единых нормативных требований по охране труда для предприятий всех форм собственности независимо от сферы хозяйственной деятельности и ведомственной подчиненности
- защита интересов работников, пострадавших в результате несчастных случаев на производстве и другие.

Каждый работник имеет право на охрану труда, в том числе:

- на рабочее место, защищенное от воздействия вредных или опасных

производственных факторов

- на возмещение вреда, причиненного увечьем, профессиональным заболеванием либо иным повреждением здоровья, связанным с исполнением им трудовых обязанностей

- на обучение безопасным методам и приемам труда за счет работодателя и др.

#### **5.4.2. Организационные меры при компоновке рабочей зоны исследователя**

Расположение и организация рабочих мест для безопасного выполнения технологических операций должны соответствовать требованиям безопасности к производственному оборудованию по ГОСТ 12.2.003.

Требования безопасности по содержанию вредных веществ, температуре, влажности и вентиляции воздуха в рабочей зоне — по ГОСТ 12.1.005, ГОСТ 12.1.007 и ГОСТ 12.4.021.

Требования электробезопасности — по ГОСТ 12.2.007.0.

Требования к защите от шума — по ГОСТ 12.1.003.

Требования к средствам коллективной и индивидуальной защиты работающих установлены в ГОСТ 12.4.011.

Требования к средствам защиты рук — по ГОСТ 12.4.020.

Для нормализации освещения производственных помещений и рабочих мест должны использоваться осветительные приборы общего освещения, световые проемы, естественная освещенность.

Для защиты от поражения электрическим током должны использоваться:

- оградительные устройства;
- токоизолирующие устройства;

– устройства защитного заземления и зануления.

Для защиты от статического электричества должны предусматриваться заземляющие устройства.

Для защиты от воздействия химических факторов предусматривают вентиляцию и знаки безопасности.

Должны быть предусмотрены следующие методы защиты от шума:

– венткамеры должны быть вынесены в отдельные помещения;

– для защиты от вибрации вентиляторы должны быть установлены на виброизолирующих опорах, на воздуховодах применены гибкие вставки.

Работники должны быть обеспечены спецодеждой и спецобувью соответствующего размера, по типовым отраслевым нормам.

Для предотвращения попадания очистителя, растворителя на руки работники должны быть обеспечены защитными перчатками.

Для предотвращения попадания паров очистителя, растворителя в органы дыхания работники должны использовать респиратор типа ШБ-1 «Лепесток» по ГОСТ 12.4.028.

В каждом помещении, в котором проводятся технологические операции, должна быть медицинская аптечка с набором необходимых медикаментов и перевязочных средств.

Помещения, в которых проводятся технологические операции, должны быть оснащены первичными средствами пожаротушения: огнетушителями, емкостью с песком, накидками из огнезащитной ткани.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Установлено, что при сварке трением с перемешиванием происходит снижение прочностных характеристик, однако с ростом скорости вращения инструмента разупрочняющее влияние снижается.

Установлено, что с ростом скорости вращения инструмента характер разрушения сварного соединения изменяется в сторону вязкого разрушения.

Установлено, что низкие скорости вращения инструмента не обеспечивают разогрев материала, достаточный для получения требуемой температуры и условий перемешивания материала.

Установлено, что низкие скорости вращения инструмента не обеспечивают разогрев материала, достаточный для рекристаллизации материала и роста зерна, что ухудшает свойства сварного соединения.

## Список литературы

1. Ищенко А.Я. Характер горячих трещин, образующихся при сварке плавлением, высокопрочных алюминиевых сплавов // Актуальные проблемы сварки цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1985. — С. 34–36.
2. Покляцкий А. Г. Сварка трением с перемешиванием — эффективный способ повышения эксплуатационных характеристик конструкций / А. Г. Покляцкий, А. Я. Ищенко, А. А. Чайка, Т. М. Лабур // Автоматическая сварка. - 2010. - № 4. - С. 45-50.  
Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/as\\_2010\\_4\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/as_2010_4_10)
3. Миронов Сергей Юрьевич Формирование зеренной структуры при сварке трением с перемешиванием // Физ. мезомех.. 2014. №1.  
URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-zerennoy-struktury-pri-svarke-treniem-s-peremeshivaniem> (дата обращения: 04.12.2016).
4. Колубаев Е. А. Особенности формирования структуры сварного соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием // Современные проблемы науки и образования. 2013. №6. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-struktury-svarnogo-soedineniya-poluchennogo-svarkoy-treniem-s-peremeshivaniem> (дата обращения: 04.12.2016).
5. Шеров К. Т. и др. Сварка трением – перспективное направление термофрикционных технологий обработки и соединения деталей // Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина.-Астана: Изд-во КазАУ. – 2010. – №. 4. – С. 66.
6. Клименко Ю. В. А. с. 195846 СССР // Б. И. 1967. Вып. 10 Sposob svarki metallov treniem [Method of friction welding for metals]. 1967.
7. C. Dawes, W. Thomas, TWI Bulletin 6, November/December 1995, p. 124.
8. Шестаков А. С. Особенности сварки трением с перемешиванием // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции для студентов и учащейся молодежи, г. Юрга, 7-9 апреля 2016 г. Т. 1.—Томск, 2016. – Изд-во ТПУ, 2016. – Т. 1. – С. 229-231.
9. <http://svarka-24.info/svarka-treniem-s-peremeshivaniem-konstrukcionnykh-materialov/>
10. Карманов В.В. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: Сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва / В.В. Карманов, А.Л. Каменева, В.В. Карманов // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2012. – № 32. – С. 67-80.

11. Котлышев Р.Р. Расчет температур при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов/ Р.Р. Котлышев, К.Г. Шучев, А.В. Крамской // Вестник ДГТУ. – 2010. – Т. 10, № 5. – С. 648-654.
12. Mishra RS, Ma ZY. Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering R Reports. 2005;50(1-2):1-78.  
Режим доступа: [http:// dx.doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001).
13. <http://svarka-24.info/preimushhestva-i-nedostatki-svarki-treniem-s-peremeshivaniem/>
14. W.M. Thomas, E.D. Nicholas, S.D. Smith, in: S.K. Das, J.G. Kaufman, T.J. Lienert (Eds.), Aluminum 2001- Proceedings of the TMS 2001 Aluminum Automotive and Joining Sessions, TMS, 2001, p. 213.
15. Friction stir butt welding: 'at. 5460317 US / W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham [et al.]. Publ. 1995.
16. Корневич А. П. и др. Особенности технологии сварки трением с перемешиванием // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – С. 20098.
17. Сеть профессиональных контактов специалистов сварки [Электронный ресурс] / Сварка трением с перемешиванием. – М, 2008. – Режим доступа: <http://www.weldzone.info/technology/ets/497-svarka-treniem-s-peremeshivaniem>. – Дата доступа: 15.04.2012.
18. Терентьев С. А., Арзыев Т. Р. УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ.
19. Ситников И. В., Саломатова Е. С. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ.
20. Рудак Д. П., Черневич К. В., Штемпель О. П. СВАРКА ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ: ОСОБЕННОСТИ, ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ. – 2013.
21. РУБЦОВ В.Е., ТАРАСОВ С.Ю., КОЛУБАЕВ Е.А. Анализ инородных включений при сварке трением с перемешиванием // Современные проблемы науки и образования. 2014. №5.  
URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-inorodnyh-vklyucheniy-pri-svarke-treniem-s-peremeshivaniem> (дата обращения: 04.12.2016).
22. <http://cu-prum.ru/alyuminiy1/splav-d16t.html>
23. <http://stanok.guru/oborudovanie/raznoe/harakteristika-splavov-alyuminiya-v-chastnosti-dyuraluminiy.html>
24. Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»: Издательство Томского политехнического университета 2014

25. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений «Методы менеджмента качества» №1 2003 г.
26. Дашковский А.Г., Романцов И.Г. Безопасность жизнедеятельности. Защита населения в чрезвычайных ситуациях. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008 – 19 с.
27. ГОСТ 12.3.002-75. Система стандартов безопасности труда. Процессы производственные. Общие требования безопасности
28. ГОСТ 12.1.004—91. Пожарная безопасность. Общие требования
29. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны

## Приложение А

### Literature review

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ61	Сулеймен Г.Б.		

Консультант школы ИШНПТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Коростелева Е.Н.	к.т.н.		

Консультант школы ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Демьяненко Н.В.			

Friction stir welding is a relatively new process of joining solids. In particular, this method can be used in joining high-strength aluminum alloys and alloys of other metals, which are difficult to succumb to the traditional types of welding - fusion welding. Not so long ago the FSW process was developed for microstructural modification of metallic materials [5].

FSW is considered as a significant discovery in the field of metal compounds over a decade; it can be attributed to "green" technologies due to its energy efficiency, environmentally friendliness and versatility. Compared to the traditional welding method, FSW consumes significantly less energy, shielding gas or flux, thereby ensuring environmental harmlessness. The joining does not include the use of filler metal, it does not matter the compatibility of the material composition, as in the case of fusion welding. In contrast to the traditional friction welding, which is mainly performed on axisymmetric, the FSW can be used for various types of joints: butt joints, T-joints, fillet joints and lap joints.

Friction welding by a rotating tool was invented in 1965. The method of welding metals by friction was proposed by Y. Klimenko according to the author's certificate No. 195846 (priority from 09.11.65) [6]. However, the method was patented in the UK in December 1991 at the The Welding Institute (TWI) [7].

The main concept of FSW is simple. A non-melting rotating tool with a special pin and shoulder inserts into the abutted edges of the workpieces and moves along the joint line (figure 1). The main functions of the instrument are heating and movement of material. Heating is caused by friction between the tool and the workpiece and plastic deformation of the workpiece. Local heating softens the material around the pin, and the combination of rotation and movement of the tool leads the material flow. Depending on the various geometric features of the tool, the material flow around the pin can be quite complicated (figure 2).

During the welding process, the material undergoes a temperature effect and an intense plastic deformation. As a result, the structure of the material changes, too. In microstructure appear fine-recrystallized grains, and this structure provides good mechanical properties of the welded joint [7].

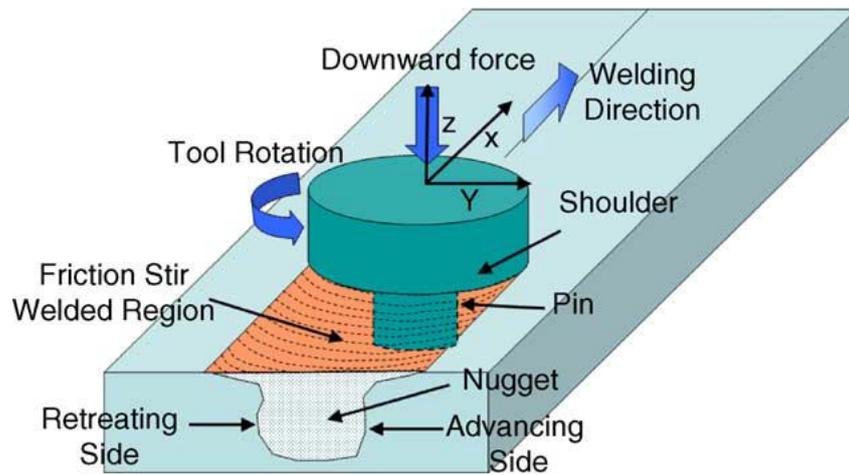


Fig. 1. Schematic drawing of friction stir welding.

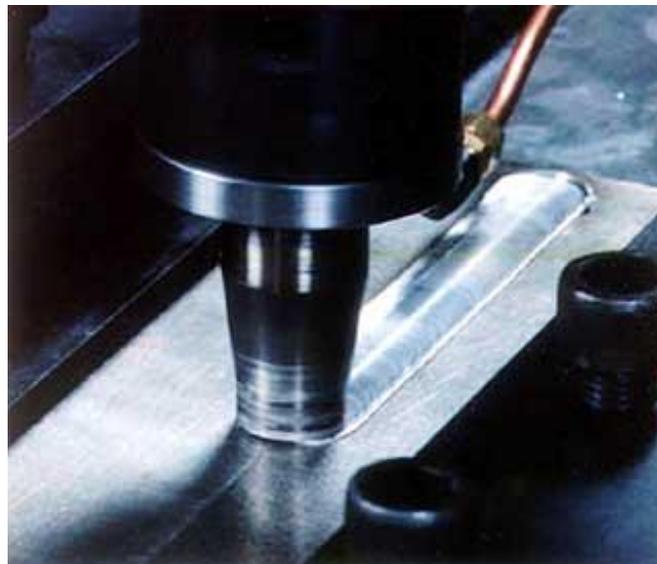


Fig. 2. Friction stir welding process [8]

## 1.2 Applications

In recent years, the friction stir welding process has been used in such critical industries as shipbuilding, car building, automotive, rocket and space and aviation. The list of large companies and organizations using the friction stir welding process, such as Boeing, Airbus, NASA, Mitsubishi, and a some other companies in the US, Europe, China and Japan, is continuously growing up.

In the USA large body parts of satellites, rockets and other products of aviation and space industries, including high strength aluminum alloys, are produced by applying the FSW process, [4]. Until recently, generally accepted

technology for the manufacture of spacecraft cases was based on fusion welding of thick plates of aluminum alloys with their sequential milling. This structure provides sufficient strength and weight reduction of the structure. Companies such as Boeing and Space X have improved their technologies by applying FSW. Their technology is based on welding of the shell of thin metal sheets with further welding to the shell of stiffeners [4].

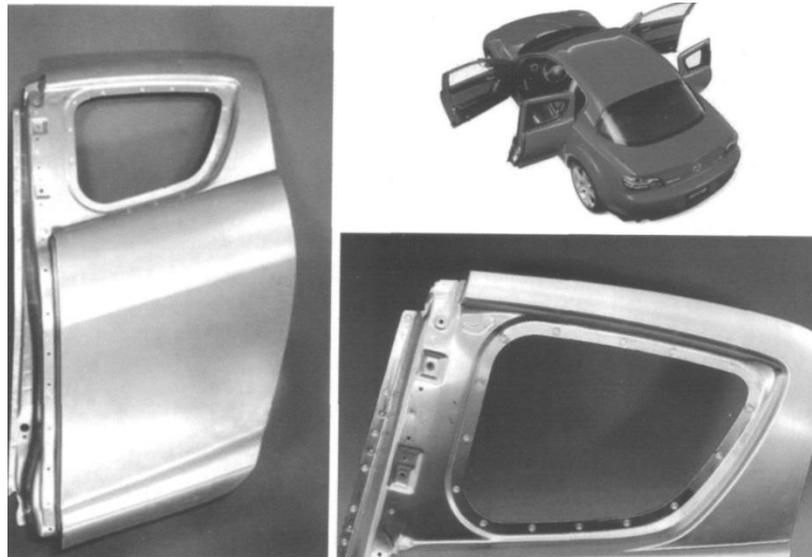


Fig. 3. Joints made on the car Mazda RX-8 with the help of spot welding with friction with mixing [9].

The using of FSW technology allows to reduce the share of rivet and fastening connections in the products of the aviation industry, which increases their reliability and reduces the cost.

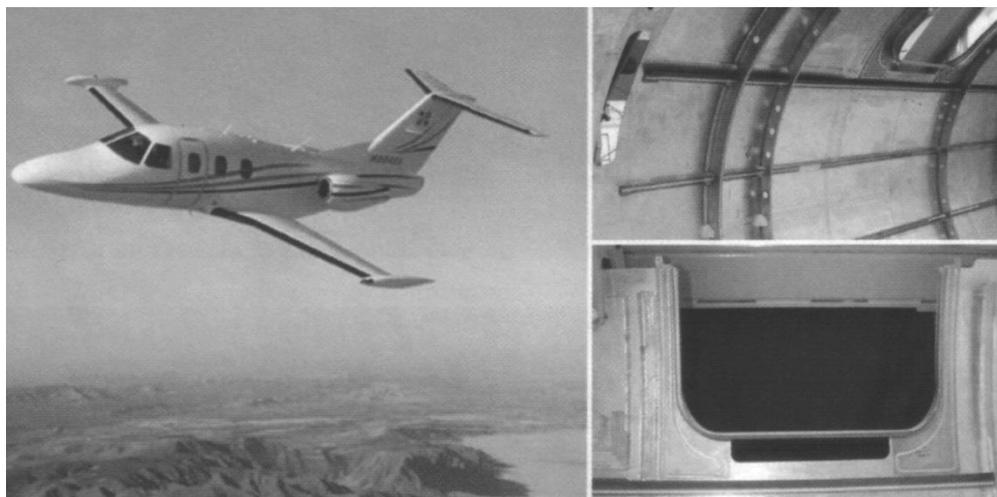


Fig. 4. Aircraft Eclipse 500 with nodes manufactured using FSW [9]

In Europe, companies that produce rail transport use FSW technology in the process of manufacturing large panels welded from aluminum profiles. At present a number of large machine building companies of railway industry have joined forces to increase the share of FSW in the production of railway equipment [4]. The successful introduction of FSW into production in Russia was realized at Cheboksary Enterprise «Sespel». The company intensively applies the FSW method in the production cycle of tanks of various transport applications and purposes [4].

At the Khrunichev State Space Research and Production Center, works are under way to introduce FSW technology into the production of hull components of launch vehicles made of aluminum alloys. A number of technical institutes of the Russian Federation are working on the introduction of the FSW method into industrial production [10, 11].

For the industry of the Russian Federation, the development and introduction of FSW into industrial production are advanced, since they open up large technological and economic opportunities for use in the aviation, space, transport and other industries.

### 1.3 The main advantages and disadvantages of the FSW

Friction stir welding has several advantages over other welding methods. The main advantages can be divided into 3 groups: metallurgical, technological, energy.

Metallurgical advantages [12]:

- the welding process proceeds in the solid phase, it reduces the number of defects caused by phase and structural transformations;
- low temperature deformation and roughness of welded joints, thereby increasing corrosion resistance;
- low shrinkage, as the welding temperature is below the fusing temperature of the metal;

□ welding without loss of alloying elements: alloying elements in the composition of alloys do not burn out, as the temperature of the material does not reach the fusing temperature;

□ absence of gas porosity in the structure of the weld;

□ fine-grained microstructure;

□ there is no cracking, as the welds are obtained to be non-porous and without residual stresses;

Technological advantages:

□ the formation of a permanent joint can be carried out without using of protective gas and perform welding in any spatial position;

□ minimum requirements for cleaning of weld surfaces, which saves time spending on auxiliary operations;

□ absence of grinding wastes; welds do not need to be swept;

□ absence of solutions for degreasing;

□ reduction of consumable materials, such as wire, carpets and other gases;

□ absence of harmful substances;

□ the possibility of easy automation of the welding process, which ensures a stable quality of the seams without a high skill of the operator.

□ reduction of costs for preparation of production.

Energy Benefits:

□ reducing the weight of structures due to the use of stronger alloys, which leads to a reduction in fuel consumption in lightweight aircraft, automobile and naval structures [12];

□ low energy intensity of the process (no costs for heating and melting of metal) [13];

The disadvantages of the FSW method include the following provisions [13]:

- the nomenclature of the materials to be welded is limited to the nomenclature of tool materials;

- the selection of technological parameters of the welding process is necessary, since their violation leads to the formation of defects;

- the need to use technological elements for input and output of the tool with their subsequent removal;
- the multifactority of the welding process, which makes it difficult to predict the structural and mechanical characteristics of the welds produced.

#### 1.4 Technological possibilities of FSW

The most convenient joint configurations for FSW are butt and lap joints. A simple square butt joint is shown in Fig. 5. Two plates or sheets with same thickness are placed on a backing plate and clamped firmly to prevent the abutting joint faces from being forced apart. During the initial plunge of the tool, the forces are fairly large and extra care is required to ensure that plates in butt configuration do not separate. A rotating tool is plunged into the joint line and traversed along this line when the shoulder of the tool is in intimate contact with the surface of the plates, producing a weld along abutting line.

On the other hand, for a simple lap joint, two lapped plates or sheets are clamped on a backing plate. A rotating tool is vertically plunged through the upper plate and into the lower plate and traversed along desired direction, joining the two plates. Many other configurations can be produced by combination of butt and lap joints.

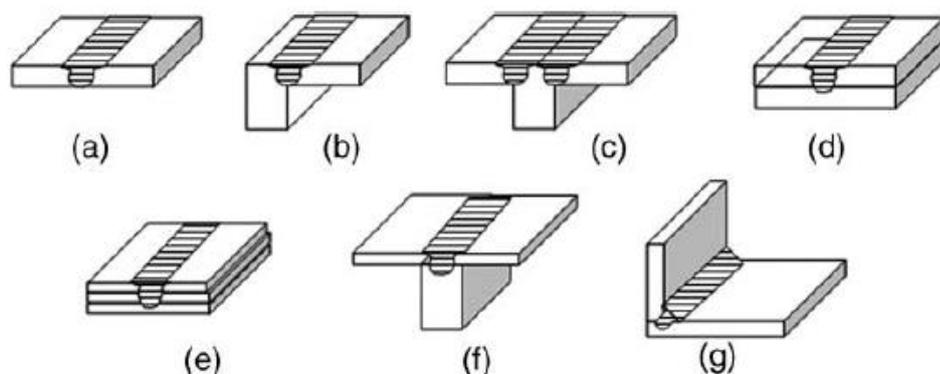


Fig. 5. Joint configurations for friction stir welding [14]

It is important to note that no special preparation is needed for FSW of butt and lap joints. Two clean metal plates can be easily joined together in the form of butt or lap joints without any major concern about the surface conditions of the plates.

### 1.5 Weldable materials

Since FSW is realized in the solid phase, the process can be used to weld a wide range of materials, for example, welding of dissimilar aluminum alloys and steels [7]. Welding of materials of different classes (for example, copper with aluminum) is difficult for each other due to the formation of intermetallic phases in the welded joint during the welding process [12].

#### Aluminum and aluminum alloys

Originally, FSW was developed as a method for welding aluminum and its alloys, since some types of aluminum alloys are poorly welded by existing methods of fusion welding, and some of them, such as high-strength and heat-treated alloys, are considered not weldable.

Difficulties in welding aluminum alloys arise in connection with the burning out and removal of alloying elements from the material, which increase the strength. For example, elements such as lithium are easily oxidized or burned during the melting of the metal, as a result of which the welded joint obtained has reduced qualitative characteristics [15].

Aluminum and its alloys are also subjected to significant temperature deformations (up to 4%) during melting and recrystallization [15]. This can cause a significant violation of the shape of the welded elements and lead to the formation of cracks due to shrinkage stresses. Friction stir welding with stirring, which is a solid-state mechanical process, minimizes the influence of temperature deformation and allows obtaining qualitative compounds from a wide range of aluminum alloys. Magnesium and magnesium alloys

There is a widespread belief that magnesium is difficult to weld using welding methods [7]. Therefore, as soon as the technological capabilities of the STF method became known on the example of welding aluminum alloys, there was an interest in using the method for welding magnesium alloys. As a result, it is established that magnesium alloys can also be welded by the FSW method. For example, the Technological Center (Yorkshire) TIS (TWI) has developed a process for welding magnesium plates 75 mm thick and 1.3x3 m in size [13].

#### Copper and copper alloys

The high thermal and electrical conductivity of copper and its alloys hampered their welding for a long time. The FSW method seems to be promising for welding these materials, since in the welding process, the thermomechanical local heating does not occur, but rather melting. SKB's research has shown positive results when welding flat samples of copper alloys [13]. The experimental installation, created on the basis of TWI, allowed to weld parts up to 50 mm thick [13].

#### Hafnium and zirconium

Hafnium and zirconium are metals for special applications in the petrochemical, oil refining and energy industries. Studies have shown that both metals can be joined by friction welding with mixing [16].

#### Heat-resistant (super-) alloys

Heat-resistant (inconel) and other high-temperature alloys have been developed for use in the design of gas turbine engines operating at high temperatures. Welding of such alloys is difficult due to cracking and microstructural segregation of alloying elements as a result of thermal action [13], which can be potentially solved using the FSW method. The application of the FSW method for welding similar materials seems promising, but it is necessary to improve instrumental materials and refine the parameters of the welding process in connection with the high temperature of their plasticization [13].

## Steel

To date, the FSW method allows to obtain welded seams of up to 30 m in structures of various types of steel [7]. At the same time, welded joints show excellent mechanical properties [13], and their corrosion resistance and fatigue properties are superior to the properties of welded joints obtained by fusion welding.

Advantages associated with the use of the FSW method for welding steels [13]:

- Reduction of distortions and, consequently, reduction of expenses for the correction of marriage;
- reduced defect formation, therefore, reduction costs and non-destructive testing are reduced;
- Improved properties of welded joints (mechanical and corrosive);
- the possibility of welding steels that are difficult or impossible to weld using other methods;
- reduction of labor costs, training and certification;
- reduction of energy consumption;

## Titanium

Despite the fact that most conventional titanium alloys are welded by conventional welding methods, there may be problems with workpiece deformation and poor weld quality. In addition, some of the titanium alloys are difficult to weld by fusion welding.

In 1995, within the framework of the internal research program TWI, technical pure titanium was welded, which proved the possibility of applying STF to titanium alloys [7].

To date, when welding titanium alloys by the FSW method, the following results are achieved [13]:

- Welding of Ti, BT-6 and BT-14 alloys;

- when welding alloy BT-6 with a thickness of 6.35 mm, the tensile strength of the welded joint reached the strength of the initial alloy;
- The cost of tooling and tools for welding titanium alloys is high.

#### Heterogeneous materials

Since FSW is a solid-phase process that mechanically mixes metals to form a bond between them, it can be used to join dissimilar metals. The process of obtaining a compound is simplified when the metals to be joined have the same thermal properties and flow temperatures. For example, the Technological Institute of Welding successfully combined copper, silver and gold, copying the ancient Japanese technology of mokey-ghan for making ornaments, but with much less waste than the traditional manual method [12].

### 1.6 Parameters of the friction stir welding process

FSW involves complex material movement and plastic deformation. Welding parameters, tool geometry, and joint design exert significant effect on the material flow pattern and temperature distribution, thereby influencing the microstructural evolution of material. In this section, a few major factors affecting FSW process, such as tool geometry, welding parameters, joint design are addressed.

#### Tool geometry

Tool geometry is the most influential aspect of process development. The tool geometry plays a critical role in material flow and in turn governs the traverse rate at which FSW can be conducted. An FSW tool consists of a shoulder and a pin as shown schematically in Fig. 6 [17]. As mentioned earlier, the tool has two primary functions: (a) localized heating, and (b) material flow. In the initial stage of tool plunge, the heating results primarily from the friction between pin and workpiece. Some additional heating results from deformation of material. The tool is plunged till the shoulder touches the workpiece. The friction between the shoulder and workpiece results in the biggest component of heating. From the heating aspect, the relative size of pin and shoulder is important, and the other

design features are not critical. The shoulder also provides confinement for the heated volume of material. The second function of the tool is to ‘stir’ and ‘move’ the material. The uniformity of microstructure and properties as well as process loads are governed by the tool design. Generally a concave shoulder and threaded cylindrical pins are used [18].

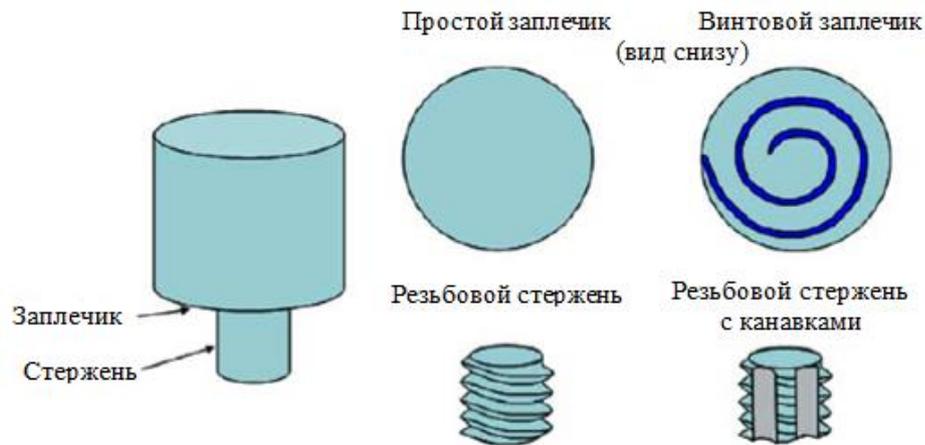


Fig. 6. Schematic drawing of the FSW tool. [18]

### Welding parameters

For FSW, two parameters are very important: tool rotation rate ( $v$ , rpm) in clockwise or counterclockwise direction and tool traverse speed ( $n$ , mm/min) along the line of joint. The rotation of tool results in stirring and mixing of material around the rotating pin and the translation of tool moves the stirred material from the front to the back of the pin and finishes welding process. However, it should be noted that frictional coupling of tool surface with workpiece is going to govern the heating. So, a monotonic increase in heating with increasing tool rotation rate is not expected as the coefficient of friction at interface will change with increasing tool rotation rate.

In addition to the tool rotation rate and traverse speed, another important process parameter is the angle of spindle or tool tilt with respect to the workpiece surface. A suitable tilt of the spindle towards trailing direction ensures that the

shoulder of the tool holds the stirred material by threaded pin and move material efficiently from the front to the back of the pin. Further, the insertion depth of pin into the workpieces (also called target depth) is important for producing sound welds with smooth tool shoulders. The insertion depth of pin is associated with the pin height. When the insertion depth is too shallow, the shoulder of tool does not contact the original workpiece surface. Thus, rotating shoulder cannot move the stirred material efficiently from the front to the back of the pin, resulting in generation of welds with inner channel or surface groove. When the insertion depth is too deep, the shoulder of tool plunges into the workpiece creating excessive flash. In this case, a significantly concave weld is produced, leading to local thinning of the welded plates [19].

#### Metal flow

The material flow during friction stir welding is quite complex depending on the tool geometry, process parameters, and material to be welded. It is of practical importance to understand the material flow characteristics for optimal tool design and obtain high structural efficiency welds. This has led to numerous investigations on material flow behavior during FSW. A number of approaches, such as tracer technique by marker, welding of dissimilar alloys/metals, have been used to visualize material flow pattern in FSW. In addition, some computational methods including FEA have been also used to model the material flow [20].

Recently, Authors suggested that the resultant microstructure and metal flow features of a friction stir weld closely resemble hot worked microstructure of typical aluminum extrusion and forging [21]. Therefore, the FSW process can be modeled as a metalworking process in terms of five conventional metal working zones: (a) preheat, (b) initial deformation, (c) extrusion, (d) forging, and (e) post heat/cool down (Fig. 7) [8]. In the preheat zone ahead of the pin, temperature rises due to the frictional heating of the rotating tool and adiabatic heating because of the deformation of material. The thermal properties of material and the traverse speed of the tool govern the extent and heating rate of this zone. As the tool moves

forward, an initial deformation zone forms when material is heated to above a critical temperature and the magnitude of stress exceeds the critical flow stress of the material, resulting in material flow. The material in this zone is forced both upwards into the shoulder zone and downwards into the extrusion zone. A small amount of material is captured in the swirl zone beneath the pin tip where a vortex flow pattern exists. In the extrusion zone with a finite width, material flows around the pin from the front to the rear. A critical isotherm on each side of the tool defines the width of the extrusion zone where the magnitudes of stress and temperature are insufficient to allow metal flow. Following the extrusion zone is the forging zone where the material from the front of the tool is forced into the cavity left by the forward moving pin under hydrostatic pressure conditions. The shoulder of the tool helps to constrain material in this cavity and also applies a downward forging force. Material from shoulder zone is dragged across the joint from the retreating side toward the advancing side. Behind the forging zone is the post heat/cool zone where the material cools under either passive or forced cooling conditions. Authors [12] developed a simple approach to metal flow modeling of the extrusion zone using mass balance considerations that reveals a relationship between tool geometry, operating parameters, and flow stress of the materials being joined. It was indicated that the calculated temperature, width of the extrusion zone, strain rate, and extrusion pressure are consistent with experimental observations.

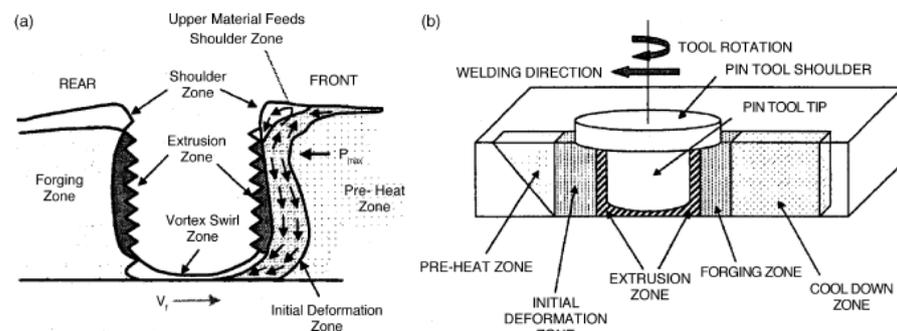


Fig. 7. (a) Metal flow patterns and (b) metallurgical processing zones developed during friction stir welding [12]

Temperature distribution

Since the temperature distribution within and around the stirred zone directly influences the microstructure of the welds, such as grain size, grain boundary character, coarsening and dissolution of precipitates, and resultant mechanical properties of the welds, it is important to obtain information about temperature distribution during FSW. However, temperature measurements within the stirred zone are very difficult due to the intense plastic deformation produced by the rotation and translation of tool. Therefore, the maximum temperatures within the stirred zone during FSW have been either estimated from the microstructure of the weld or recorded by embedding thermocouple in the regions adjacent to the rotating pin [7].

In summary, many factors influence the thermal profiles during FSW [7]. From numerous experimental investigations and process modeling, we conclude the following. First, maximum temperature rise within the weld zone is below the melting point of aluminum. Second, tool shoulder dominates heat generation during FSW. Third, maximum temperature increases with increasing tool rotation rate at a constant tool traverse speed and decreases with increasing traverse speed at a constant tool rotation rate. Furthermore, maximum temperature during FSW increases with increasing the ratio of tool rotation rate/traverse speed. Fourth, maximum temperature rise occurs at the top surface of weld zone. Various theoretical or empirical models proposed so far present different pseudo-heat index. The experimental verification of these models is very limited and attempts to correlate various data sets with models for this review did not show any general trend. The overall picture includes frictional heating and adiabatic heating. The frictional heating depends on the surface velocity and frictional coupling (coefficient of friction). Therefore, the temperature generation should increase from center of the tool shoulder to the edge of the tool shoulder. The pin should also provide some frictional heating and this aspect has been captured. In addition, the adiabatic heating is likely to be maximum at the pin and tool shoulder surface and decrease away from the interface. The results indicate that the frictional

condition change from ‘stick’ at lower tool rotation rates to ‘stick/slip’ at higher tool rotation rates [14].

### Microstructural evolution

The contribution of intense plastic deformation and high-temperature exposure within the stirred zone during FSW results in recrystallization and development of texture within the stirred zone and precipitate dissolution and coarsening within and around the stirred zone. Based on microstructural characterization of grains and precipitates, three distinct zones, stirred (nugget) zone, thermo-mechanically affected zone (TMAZ), and heat-affected zone (HAZ), have been identified as shown in Fig.8. The microstructural changes in various zones have significant effect on postweld mechanical properties. Therefore, the microstructural evolution during FSW/FSP has been studied by a number of investigators.

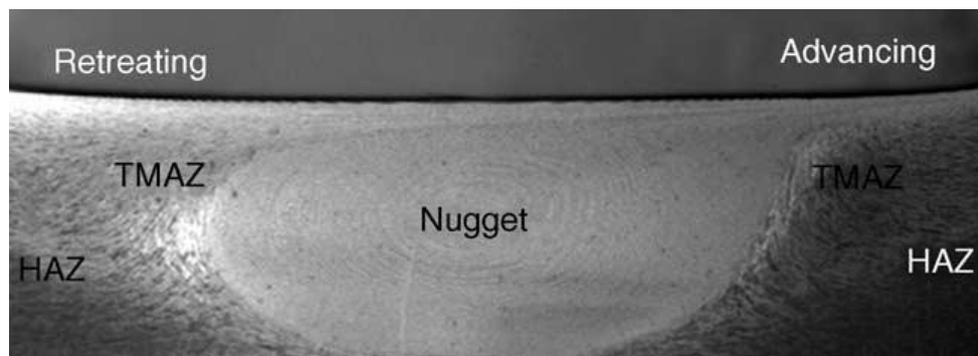


Fig. 8. A typical macrograph showing various microstructural zones in FSW 7075Al-T651 (standard threaded pin, 400 rpm and 51 mm/min) [12]

### Nugget zone

Intense plastic deformation and frictional heating during FSW result in generation of a recrystallized fine-grained microstructure within stirred zone. This region is usually referred to as nugget zone (or weld nugget) or dynamically recrystallized zone (DXZ). Under some FSW conditions, onion ring structure was observed in the nugget zone. In the interior of the recrystallized grains, usually there is low dislocation density [15]. However, some investigators reported that the

small recrystallized grains of the nugget zone contain high density of sub-boundaries, subgrains, and dislocations. The interface between the recrystallized nugget zone and the parent metal is relatively diffuse on the retreating side of the tool, but quite sharp on the advancing side of the tool.

Reynolds investigated the relationship between nugget size and pin size. It was reported that the nugget zone was slightly larger than the pin diameter, except at the bottom of the weld where the pin tapered to a hemispherical termination. Further, it was revealed that as the pin diameter increases, the nugget acquired a more rounded shape with a maximum diameter in the middle of the weld [12].

#### Heat-affected zone

Beyond the TMAZ there is a heat-affected zone (HAZ). This zone experiences a thermal cycle, but does not undergo any plastic deformation. Mahoney et al. defined the HAZ as a zone experiencing a temperature rise above 250°C for a heat-treatable aluminum alloy. The HAZ retains the same grain structure as the parent material. However, the thermal exposure above 250°C exerts a significant effect on the precipitate structure [15].

While FSW process has relatively little effect on the size of the subgrains in the HAZ, it results in coarsening of the strengthening precipitates and the precipitate-free zone increases [7].

#### Thermo-mechanically affected zone

Unique to the FSW/FSP process is the creation of a transition zone—thermo-mechanically affected zone (TMAZ) between the parent material and the nugget zone, as shown in Fig. 9. The TMAZ experiences both temperature and deformation during FSW. A typical micrograph of TMAZ is shown in Fig. 8. The TMAZ is characterized by a highly deformed structure. The parent metal elongated grains were deformed in an upward flowing pattern around the nugget zone. Although the TMAZ underwent plastic deformation, recrystallization did not occur in this zone due to insufficient deformation strain. However, dissolution of some

precipitates was observed in the TMAZ due to high-temperature exposure during FSW [17]. The extent of dissolution, of course, depends on the thermal cycle experienced by TMAZ. Furthermore, it was revealed that the grains in the TMAZ usually contain a high density of sub-boundaries [12].

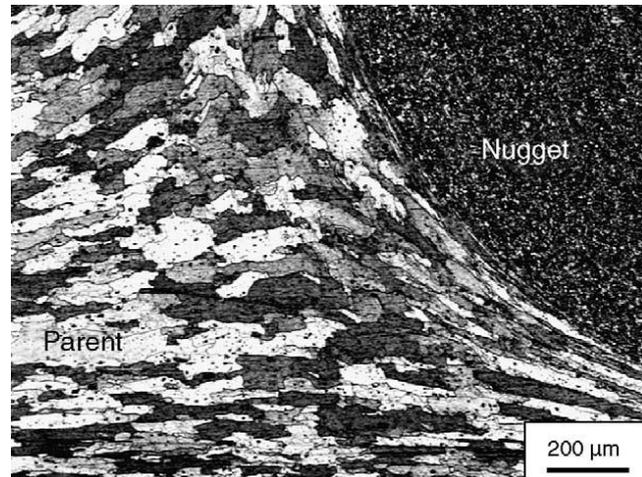


Fig. 9. Microstructure of thermo-mechanically affected zone in FSP 7075Al [16]