

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедение

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Модификация структуры алюминиево-магниевого сплава методом фрикционной перемешивающей обработки инструментами различной конфигурации.

УДК 669.715.055:669.721.5.063

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ91	Судариков Александр Владимирович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ	Клименов В.А.	Д.Т.Н., профессор		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН ШБИП ТПУ	Жиронкин С.А.	Д.Э.Н., профессор		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Скачкова Л.А.			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.04.01 Материаловедение и технологии материалов	Буюкова С.П.	Д.Т.Н., профессор		

Томск – 2021 г.

## Планируемые результаты обучения ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
<b>УК(У)-1</b>	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
<b>УК(У)-2</b>	Способен управлять проектом на всех этапах жизненного цикла
<b>УК(У)-3</b>	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
<b>УК(У)-4</b>	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном языке, для академического и профессионального взаимодействия
<b>УК(У)-5</b>	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
<b>УК(У)-6</b>	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
<b>ОПК(У)-1</b>	Способен решать производственные и/или исследовательские задачи, на основе фундаментальных знаний в области материаловедения и технологии материалов
<b>ОПК(У)-2</b>	Способен разрабатывать научно-техническую, проектную и служебную документацию, оформлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации, рецензии
<b>ОПК(У)-3</b>	Способен участвовать в управлении профессиональной деятельностью, используя знания в области системы менеджмента качества
<b>ОПК(У)-4</b>	Способен находить и перерабатывать информацию, требуемую для принятия решений в научных исследованиях и в практической технической деятельности
<b>ОПК(У)-5</b>	Способен оценивать результаты научно-технических разработок, научных исследований и обосновывать собственный выбор, систематизируя и обобщая достижения в области материаловедения и технологии материалов, смежных областях
<b>Профессиональные компетенции</b>	
<b>ПК(У)-1</b>	Способен обоснованно (осмысленно) использовать знания основных типов металлических, неметаллических и композиционных материалов различного назначения, в том

	числе наноматериалов для решения профессиональных задач.
<b>ПК(У)-2</b>	Способен осуществлять рациональный выбор материалов и оптимизировать их расходование на основе анализа заданных условий эксплуатации материалов, оценки их надежности, экономичности и экологических последствий применения
<b>ПК(У)-3</b>	Способен осуществлять анализ новых технологий производства материалов и разрабатывать рекомендации по составу и способам обработки конструкционных, инструментальных, композиционных и иных материалов с целью повышения их конкурентоспособности
<b>ПК(У)-4</b>	Способен планировать и осуществлять экспериментальные исследования, анализировать и обрабатывать их результаты, делать выводы, составлять и оформлять отчеты по проведенным исследованиям
<b>ПК(У)-5</b>	Способен выполнять перевод технической литературы на иностранном языке, связанной с профессиональной деятельностью в области материаловедения
<b>ПК(У)-6</b>	Способен решать задачи, относящиеся к производству, обработке и модификации материалов и покрытий, деталей и изделий
<b>ПК(У)-7</b>	Способен организовать проведение анализа и анализировать структуру новых материалов, адаптировать методики исследования свойств материалов к потребностям производства и разрабатывать специальные методики
<b>ПК(У)-8</b>	Способен проектировать и организовывать учебный процесс по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедение

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ С.П. Бужкова  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ91	Сударикову Александру Владимировичу

Тема работы:

Модификация структуры алюминиево-магниевого сплава методом фрикционной перемешивающей обработки инструментами различной конфигурации.	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	03.03.2021, № 62-47/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом магистерской диссертации являются материалы на основе алюминиевого сплава АМг5, модифицированные фрикционной перемешивающей обработкой инструментами различной конфигурации.</p>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Изучить литературу по темам: сварка трением с перемешиванием, обработка трением с перемешиванием, модификация поверхностного слоя материала. Произвести модифицирование приповерхностной структуры данного сплава методом фрикционной перемешивающей обработки. Исследовать влияние конфигурации инструмента и количества проходов на структурные и механические характеристики.</p>

<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Жиронкин С.А., д.э.н., профессор ОСГН ШБИП ТПУ
Социальная ответственность	Скачкова Л.А., ст. преподаватель ТПУ
Разделы, выполненные на иностранном языке	Евсеева А.М., ст. преподаватель ТПУ
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ	Клименов В.А.	д.т.н., профессор		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ91	Судариков Александр Владимирович		

## РЕФЕРАТ

Работа включает в себя 112 страниц, 20 таблиц, 51 рисунок, 5 глав, приложение А (на английском языке), 66 литературных источников.

Ключевые слова: фрикционная перемешивающая обработка, алюминиевые сплавы, модификация поверхности, сварка трением с перемешиванием.

Объектом исследования является технологический процесс модификации алюминиевого сплава АМг5 фрикционной перемешивающей обработкой инструментами различной конфигурации.

Цель работы – модификация структуры алюминиево-магниевого сплава методом фрикционной перемешивающей обработки с различной конфигурацией инструмента.

В ходе исследования рассматривались образцы, полученные методом фрикционного перемешивания с алюминиевой матрицей.

В качестве основного материала композитов выступал алюминиевый сплав АМг5. В качестве инструмента для перемешивания применялись пины квадратного и винтового сечения. Исследование макроструктуры образцов и их механических свойств производилось при помощи металлографического микроскопа и универсальной разрывной машины. Микротвердость определялась при помощи стационарного микротвердомера Duramin 5.

## **Обозначения, сокращения, нормативные ссылки.**

ФПО – фрикционная перемешивающая обработка;

СТП – сварка трением с перемешиванием;

ЗТМВ – зона термомеханического влияния;

ЗП – зона перемешивания;

ЗТВ – зона термического влияния;

КТР – коэффициент термического расширения;

НИР – научно-исследовательская разработка;

ГОСТ 1583-93 – МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ Сплавы  
алюминиевые литейные Технические условия;

ГОСТ 1497-84 – МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ МЕТАЛЛЫ  
Методы испытаний на растяжение.

## Оглавление

Введение.....	11
1. Обзор и анализ литературы.....	13
1.1 Способы модификации и упрочнения алюминиевых материалов и сплавов .....	13
1.2 Сущность процесса сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов.....	16
1.3 Сущность метода перемешивающей фрикционной обработки .....	25
1.4. Влияние модификаторов на структуру и механические свойства материалов, полученных методом фрикционной перемешивающей обработки .....	33
2. Объект и метод исследования.....	40
2.1 Оборудование и материалы .....	40
2.2 Методика проведения эксперимента.....	43
2.3 Проведение исследований макроструктуры образцов сплава АМг5, полученных фрикционной перемешивающей обработкой инструментом различной конфигурации .....	46
2.4. Исследование влияния конфигурации инструмента для фрикционной перемешивающей обработки на механические свойства материала зоны перемешивания.....	49
2.5 Исследование влияния конфигурации инструмента для фрикционной перемешивающей обработки на микротвердость зоны перемешивания .....	52
Выводы .....	58
3 Заключение.....	59
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...	60
4.1 Техничко-экономическое обоснование .....	61
4.2 Потенциальные потребители результатов исследования .....	61
4.3 SWOT-анализ.....	61
4.4 Планирование работ по НИР .....	64
4.4.1 Определение трудоемкости выполнения работ .....	66



4.4.2 Построение графика работ .....	66
4.4.3 Бюджет научно технического исследования (НИР) .....	71
4.4.3.1 Расчет материальных затрат НИР .....	72
4.4.3.2 Расчет затрат на экспериментальное оборудование для научных работ .....	73
4.4.3.3 Основная заработная плата исполнителем темы .....	75
4.4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	77
4.4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	78
4.4.3.6 Накладные расходы.....	78
4.4.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	79
4.5 Определение финансовой эффективности и ресурсоэффективности .....	80
4.5.1 Определение финансовой эффективности .....	80
4.5.2 Определение ресурсоэффективности.....	80
4.6 Заключение по разделу .....	82
5 Социальная ответственность .....	85
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. ....	86
5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства .....	86
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя. ....	87
5.2 Производственная безопасность.....	88
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов. ....	88
5.2.2.1 Отклонение показаний микроклимата .....	89
5.2.2.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны .....	90
5.2.2.3 Превышение уровня шума .....	92
5.2.2.4 Отсутствие или недостаток естественного света.....	93
5.2.2.5 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека .....	94
5.2.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.....	95

5.2.3.1 Требования к помещениям для работы с ПЭВМ.....	95
5.2.3.2 Микроклимат .....	95
5.2.3.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны .....	96
5.2.3.4 Повышенный уровень шума .....	96
5.2.3.5 Отсутствие или недостаток естественного света .....	97
5.2.3.6 Поражение электрическим током .....	97
5.3 Экологическая безопасность.....	98
5.3.1 Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду. ....	98
5.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду. ....	99
5.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды. ....	99
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	100
5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований. ....	100
5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС. ....	101
5.5 Заключение по разделу «Социальная ответственность» .....	102
Список публикаций.....	104
Список литературы .....	105
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	112

## Введение

В настоящее время конструкционные алюминиевые сплавы имеют существенное практическое значения для производства конструкций и многофункциональных изделий автомобилестроения, судостроения, авиационного и ракетно-космического назначения. Отличительной особенностью данных сплавов является их высокие значения удельной прочности, возможность долговременной эксплуатации в легких и прочных конструкциях при заданных нагрузках, возможностью выбора в широком диапазоне подходящего состава сплава для достижения необходимых свойств. При этом, ряд негативных свойств алюминиевых сплавов затрудняет их применение, например, в узлах трения, из-за их невысоких трибологических характеристик. Для повышения износостойкости поверхности алюминиевых сплавов возможно получение поверхностных композиционных структур с формированием упрочненных слоёв с наличием компонентов в виде твердых частиц типа оксидов, карбидов или интерметаллидов. Спектр возможных методов получения композиционных материалов с металлической матрицей достаточно широк, и включает в себя как методы, основанные на плавлении металла в зоне формирования композита (лазерные и электронно-лучевые аддитивные технологии, напыление, наплавка и др.), так и на получении композиционного материала путем обработки в твердой фазе [1–8]. Среди твердофазных методов получения композиционных материалов с металлической матрицей, позволяющих формировать изделия с равномерным распределением упрочняющих фаз в объеме материала, одним из наиболее актуальных на настоящее время является фрикционная перемешивающая обработка или обработка трением с перемешиванием.

Фрикционная перемешивающая обработка, наиболее активно изучаемая в последнее десятилетие, внесла значительный вклад в создание функционально-градиентных материалов с плавно изменяющимися структурой и механическими свойствами. С использованием фрикционной

перемешивающей обработки возможно повышение как трибологических свойств изделий из металлов и сплавов, так и прочностных свойств с модификацией тех областей изделия, где необходимы конкретные функциональные свойства в процессе эксплуатации. При этом, имеется ряд неописанных на настоящее время процессов в зоне фрикционной перемешивающей обработки при формировании композиционных материалов с формированием упрочняющих фаз непосредственно в процессе обработки. К ним относятся как механизмы пластического течения материала в зоне обработки по контуру инструмента, так и процессы структурно-фазового приспособления материала при обработке.

Исходя из вышеперечисленного, целью настоящей работы является модификация структуры алюминиево-магниевого сплава методом фрикционной перемешивающей обработки с различной конфигурацией инструмента.

## **1. Обзор и анализ литературы**

### **1.1 Способы модификации и упрочнения алюминиевых материалов и сплавов**

В настоящее время алюминий и его сплавы используются в различных областях промышленности и производства, например, в автомобилестроении и авиакосмической промышленности. Условия эксплуатации авиационной и космической техники определяют крайне жесткие требования к материалам, от качества которых в существенной мере зависят надежность и конкурентоспособность летательных аппаратов.

На сегодняшний день известно множество способов модификации поверхностного слоя материала, к ним можно отнести такие методы, как алмазное выглаживание, вибронакатывание, плазменное напыление и другие. Однако, многие из этих методов имеют существенные недостатки в виде малой толщины модифицированного слоя, стоимости и низкой экологичности.

В настоящее время широкую известность получил такой метод обработки, как фрикционная перемешивающая обработка. Интерес в этом процессе вызывает возможность определения закономерностей взаимодействия материалов при интенсивном термомеханическом взаимодействии в квазивязком состоянии. Также, интерес вызывает возможность упрочнения поверхности без плавления материала. С помощью данного метода возможно создание градиентных материалов с упрочненной структурой поверхностного слоя с ультрамелкодисперсной зеренной структурой.

Метод обработки трением с перемешиванием произошел от технологии сварки трением с перемешиванием и включает аналогичные процессы и принципы [2]. Подвергаемый обработке металл механически перемешивают с помощью не расходуемого вращающегося инструмента. Инструмент

вращается с высокой скоростью, а затем погружается в заготовку под действием осевого усилия до тех пор, пока плечи инструмента не коснутся поверхности заготовки. Затем инструмент продвигается по заготовке в направлении обработки. При трении между инструментом и заготовкой выделяется большое количество тепла. По мере повышения температуры из-за тепла трения основной металл размягчается в зоне обработки и подвергается интенсивной пластической деформации и увлекается вращающимся и перемещающимся пином.

Это основной принцип модификации металлических материалов с помощью ФПО, что приводит к образованию подповерхностной градиентной структуры в материале за счет измельчения зерен и микроструктурной гомогенизации. Некоторые методы сварки трением с перемешиванием или обработки включают дополнительные процессы, например, применение ультразвука к зоне сварки / обработки [7] или многопроходная обработка для упрочнения всей поверхности [8].

Изучая литературные источники, посвященные модификации поверхностного слоя методом фрикционной перемешивающей обработки, можно выделить три основных типа модификации поверхностного слоя материала.

Первый тип посвящен упрочнению поверхностного слоя материала посредством измельчения зерен с образованием ультрамелкодисперсной структуры [9–11]. При этом в структуре, например, алюминиевых сплавов, преобладают полностью рекристаллизованные равноосные зерна аналогично со сваркой трением с перемешиванием [11,12]. В качестве примера этого способа можно рассмотреть пластину сплава АМг5 (рисунок 1.1.1), упрочненную методом ФПО.

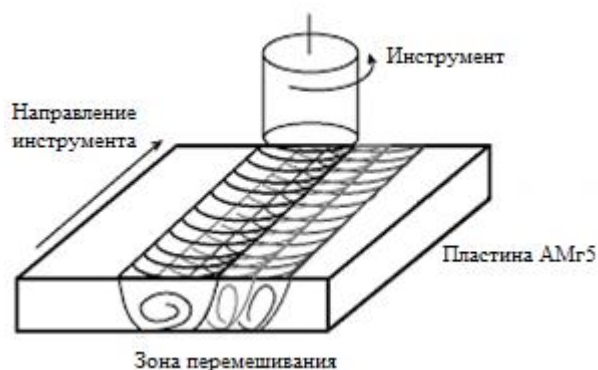


Рисунок 1.1.1 – Пример упрочнению поверхностного слоя материала посредством измельчения зерен [13].

Механические свойства полученных материалов в испытаниях на растяжение увеличиваются в зависимости от сплава как на незначительную величину менее 10...15 %, так и на величину более чем 30 % [11,14,15].

Второй тип работ посвящен упрочнению поверхностного слоя путем замешивания в поверхность различных дисперсных частиц, приводящих к измельчению структуры и повышению эксплуатационных характеристик изделия путем заполнения канавок с проходом инструмента вдоль канавки [11,16,17].

Третий тип работ направлен на получение фрикционной перемешивающей обработкой смеси фаз в поверхностном слое, например, путем внедрения меди в поверхностный слой алюминиевого сплава с помощью порошков или внедряемых элементов [11,18]. При этом для замешивания в поверхностный слой упрочняющих частиц используется как порошковый материал, засыпаемый в углубления в поверхностном слое, так и различные цилиндрические элементы, внедренные в поверхностный слой, а также листовой материал (рисунок 1.1.2).

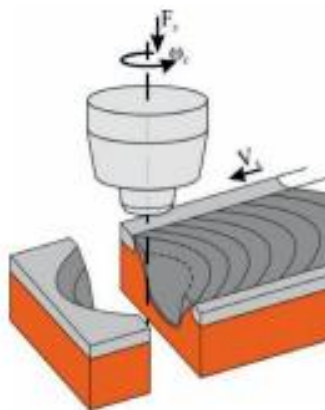


Рисунок 1.1.2 – Фрикционная перемешивающая обработка смеси фаз в поверхностном слое [11].

С помощью таких методик возможно получение композиционных материалов с металлической матрицей различного состава. При этом в основе методов получения материала с разнородной структурой лежит процесс адгезионного трения, включающий в себя процесс пластической деформации и фрагментации материала в зоне трения с образованием пластического течения материала. При этом в условиях наличия в поверхностном слое двух материалов с различными физико-механическими свойствами в процессе образования различных потоков материала и их интенсивного взаимодействия в стесненных условиях происходит образование сложной смеси входящих в реакцию компонентов системы и результатов их взаимодействия в виде твердых растворов или интерметаллидных фаз [11,19].

## **1.2 Сущность процесса сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов**

Сварка трением с перемешиванием (СТП)» - это недавно разработанный метод твердофазного соединения, который отличается высокой энергоэффективностью и гибкостью. С момента основания в 1991 г.



«Институтом сварки (TWI)», Великобритания, он широко используется в таких областях промышленности, как автомобильная, авиационная, морская, железнодорожная и аэрокосмическая промышленность [1,20].

Техника СТП имеет множество преимуществ по сравнению с традиционными методами сварки. Соединения после такого вида сварки обладают достаточно высокой прочностью, примерно равной прочности исходного материала. Благодаря применению этой техники возможно значительное снижение веса конструкции. При этом возможно соединение сплавов, которые невозможно сварить с помощью методов сварки плавлением.

СТП выполняется при температуре ниже точки плавления основного металла. Таким образом, можно избежать всех аномалий, связанных с повторным затвердеванием свариваемого материала, таких как пористость, хрупкость и образование трещин.

Поскольку процесс СТП проводится при более низких температурах, он не испытывает больших деформаций и остаточных напряжений. Этот метод также обеспечивает большую стабильность размеров. В отличие от обычных сварочных процессов, СТП не требует присадочного материала или защитного газа.

Благодаря бесчисленному количеству таких качеств и преимуществ СТП по сравнению с обычными процессами соединения, он стал быстро развивающимся методом твердотельного соединения.

Принцип сварки трением с перемешиванием продемонстрирован на рисунке 1.2.1 1): вращающийся шпиндель с цилиндрическим инструментом особой формы с плечами и пином в центре погружается в линию соединения подлежащих сварке крепко зафиксированных и плотно прижатых друг к другу деталей. Получаемое при этом количество тепла достаточно для пластификации материала, избегая плавления. Нагретый до пластического состояния металл перемещается из зоны перед пином в зону за ним, формируется заплечиками и при охлаждении образует сварное соединение.

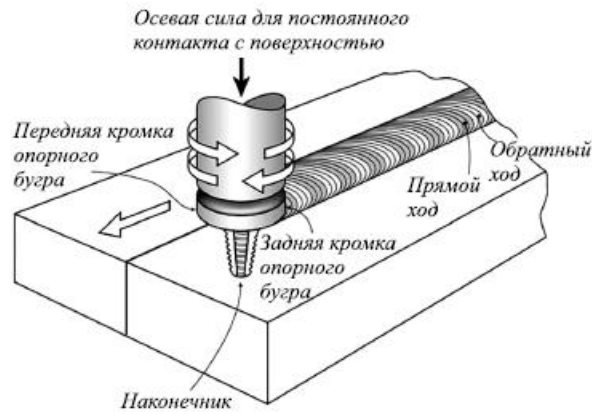


Рисунок 1.2.1 – Схема процесса сварки трением с перемешиванием (СТП) [24].

Так как выделяющейся в процессе СТП теплоты недостаточно для плавления в области формирования соединения, снижается вероятность возникновения многих дефектов, характерных сварным соединениям при сварке плавлением [20–22].

Сварной шов, получаемый согласно рассмотренному способу, несимметричен относительно своей продольной оси (рисунок 1.2.2), так как материал с фронтальной стороны инструмента вытесняется пином по направлению вращения на тыльную сторону – с отступающей стороны сварки [20–22].

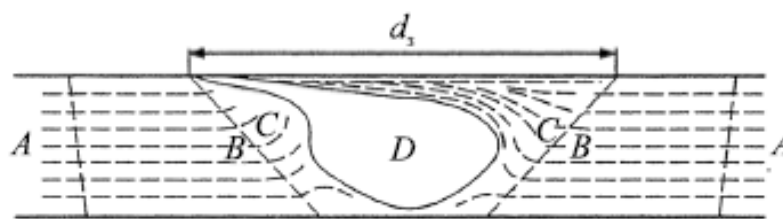


Рисунок 1.2.2 – Схема расположения структурных зон А – основной металл, В – зона термического воздействия, С – зона термомеханического воздействия, D – ядро шва;  $d_3$  – диаметр плеч [20].

Макроструктура швов, полученных сваркой трением с перемешиванием (рисунок 1.2.3), имеет особенности, которые не присущи швам, полученными другими способами. Основным отличием является

формирование в центре соединения ядра, которое независимо от свариваемого сплава содержит концентрические овалы, различающиеся своей микроструктурой [20].

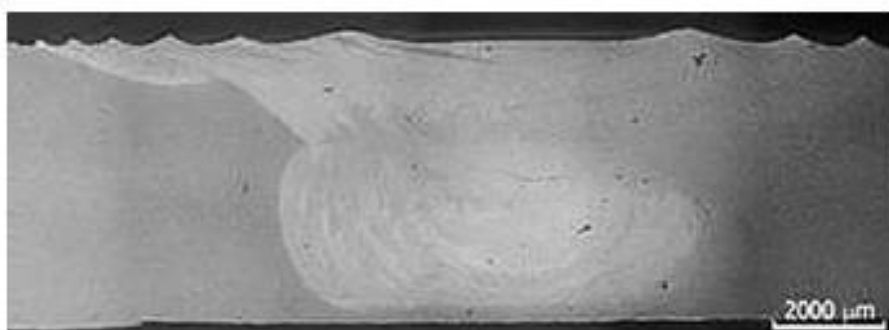


Рисунок 1.2.3 – Макроструктура стыкового соединения листов сплава 1565чМ толщиной 5 мм, полученного СТП [25].

Форма ядра шва зависит от свариваемого материала. Диаметр ядра шва незначительно превышает диаметр штыря инструмента. Ядро располагается в нижней части соединения. Непосредственно около ядра и в самом ядре можно отметить существенные изменения структуры, которые вызваны значительной пластической деформацией металла с разворотом зерен на угол до  $90^\circ$  [20].

Микроструктура ядра состоит из равноосных зерен, размер которых определяется технологией сварки, используемым материалом и технологией его обработки. Размер зерна в ядре шва не превышает 10 мкм. Твердость этой зоны для термически упрочняемых алюминиевых сплавов и термически неупрочняемых сплавов в нагартованном состоянии ниже, чем у основного металла. В то же время твердость этой зоны превышает твердость термически упрочняемых сплавов в отожженном состоянии [20,24].

При увеличении толщины свариваемых заготовок из алюминиевых сплавов свыше 8-10 мм наблюдается изменение конфигурации шва в поперечном сечении (рисунок 1.2.4). Верхняя часть шва приобретает в сечении форму трапеции, обращенной большим основанием в сторону обрабатывающего инструмента.

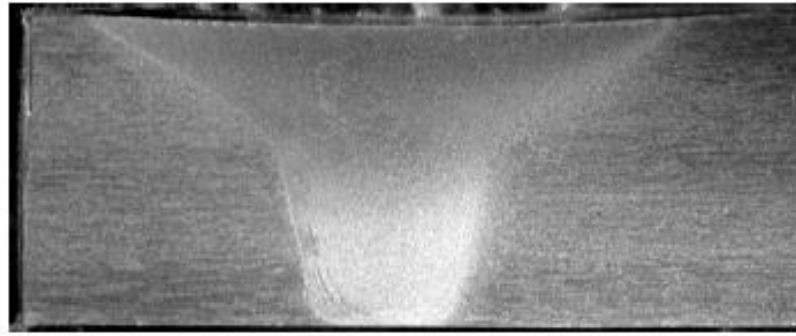


Рисунок 1.2.4 – Микроструктура соединения СТП плит алюминиевого сплава АМг5 толщиной 18 мм [25].

Кроме изменения формы шва было установлено, что при увеличении толщины свариваемых заготовок наблюдается уменьшение среднего размера зерна в зоне ядра шва с 2,2-3,5 мкм до 1,5-1,7 мкм [24]. При этом предел прочности металла шва для сплава 1570С возрастает с 355 до 370 МПа.

Основными параметрами процесса СТП принято считать следующие характеристики (рисунок 1.2.5): угол наклона инструмента относительно вертикальной оси  $\theta$ ; усилие прижатия инструмента к поверхностям соединяемых деталей  $F$ ; величину погружения бурта (корпуса) инструмента  $t$ ; глубину проникновения пина инструмента в свариваемый металл  $l_n$ ; а также скорости вращения инструмента  $n$  и его линейного перемещения  $V_{св}$  (скорости сварки) [24].

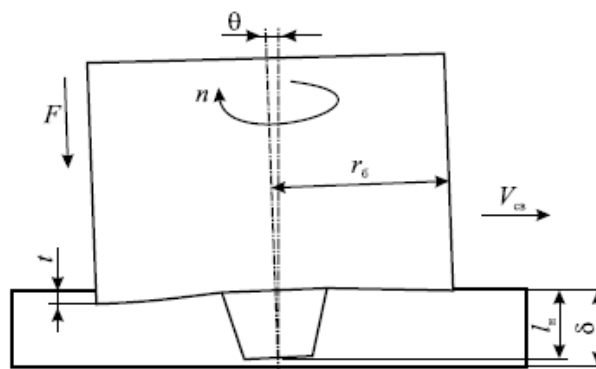


Рисунок 1.2.5 – Основные параметры сварки трением с перемешиванием [25].

В некоторых исследованиях определяются оптимальные соотношения между скоростями сварки и вращения инструмента, выражающими расстояние перемещения инструмента вдоль стыка за один его оборот, в зависимости от толщины свариваемого материала или температурного интервала кристаллизации алюминиевых сплавов [24].

Так, индийские исследователи проводили наблюдение по эволюции микроструктуры алюминиевого сплава AA2219 при сварке трением с перемешиванием [26]. Характеристику структуры сплава они определяли при помощи оптической и просвечивающей электронной микроскопии.

По результатам исследования было определено, что свариваемый металл состоял из очень мелких равноосных зерен. Значительное укрупнение зерен наблюдалось в зоне термического влияния (HAZ), в то время как в зоне термомеханического воздействия (TMAZ) оно происходило в меньшей степени (рисунок 1.2.6).

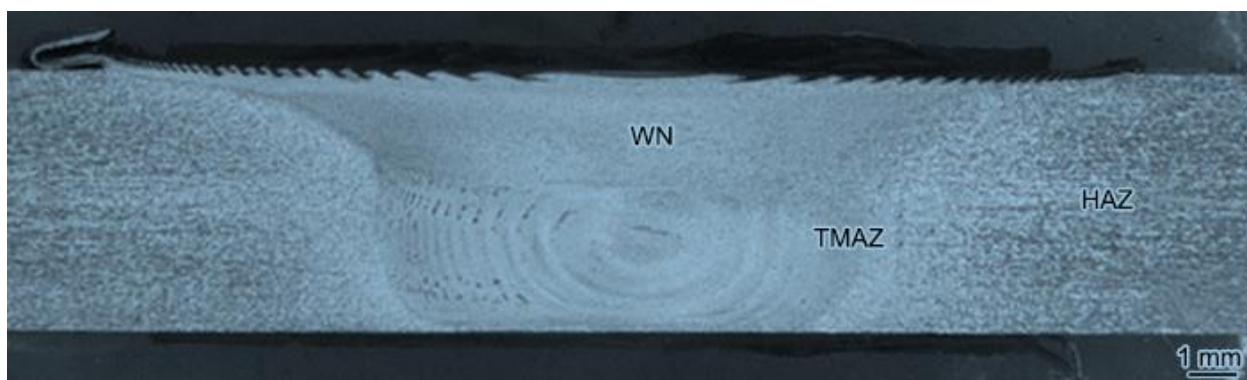


Рисунок 1.2.6 – Микроструктура алюминиевого сплава AA2219 после сварки трением с перемешиванием [26].

На рисунке 1.2.7 показана зона термомеханического влияния на границе с ЗТВ.

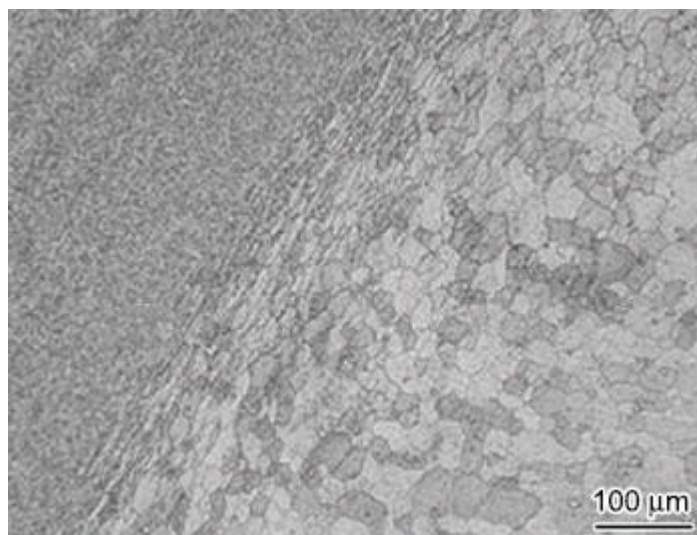
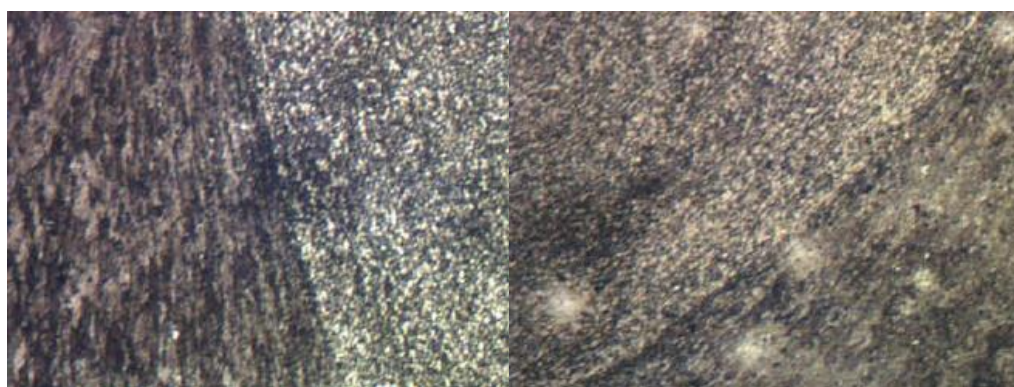


Рисунок 1.2.7 – Зона термомеханического влияния (ЗТМВ) алюминиевого сплава AA2219 [26].

Измерения разориентации границ зерен с использованием EBSD показали непрерывные динамические рекристаллизации зерен в зоне сплавления металла.

Прочностные характеристики сварных соединений при сварки трением могут зависеть и от последующей термообработки материала. Так, турецкие коллектив авторов из университета Улудаг, исследовали прочностные характеристики алюминиевых сплавов 2024-O, 2024-W, 2024-T4, 2024-T6 [27]. Исследования проводились при помощи оптической и просвечивающей электронной микроскопии.

Оптическое изображения микроструктуры переходной зоны ядра шва и ЗТМВ в сплавах 2024-T6 и 2024-O представлены на рисунке 1.2.8.



а

б

Рисунок 1.2.8 – Оптическое изображение микроструктуры переходной зоны ядра шва и ЗТМВ в сплавах 2024-T6 и 2024-O, а – участок переходной зоны алюминиевого сплава 2024-T6; б – участок переходной зоны алюминиевого сплава 2024-O [27].

Ученые установили, что значения микротвердости в зоне сварного шва соединения Al 2024-O выше, чем у основного материала, что свидетельствует о том, что зона сварного шва была усилена процессом ФПО.

Значения микротвердости в сплавах 2024-T4 и -T6 при выдержке материала при температуре 190°C порядка 10 ч оказались частично выше, чем в соединениях 2024-W и -T6 при выдержке материала при температуре 100°C также порядка 10 ч.

Прочность соединений на растяжение повышается по мере дисперсионного отверждения основного материала. Максимальные свойства при растяжении для швов достигаются в шве 2024-T6 (190°C - 10 ч). При этом прочность на растяжение у сплавов оказалась ниже, чем у основного металла.

Было показано, что сварные соединения, выполненные сваркой трением с перемешиванием из алюминиевых сплавов 2024 в разном термообработанном состоянии, имеют разные характеристики расположения трещин при испытаниях на разрыв.

Так, разрыв сплава 2024-O, имеющего полностью стабильное состояние основного материала, произошел в зоне основного металла. У сплава 2024-W, имеющем нестабильное состояние основного металла, место излома находится в центральной зоне металло шва (ядре) и на границе с ЗТВ, тогда как в соединениях 2024-T4, 2024-T6, которые состарились до состояния основного металла, трещина произошла в зоне термического и термомеханического влияния.

Сравнительный гистограмма прочностных характеристик алюминиевых образцов при растяжении представлен на рисунке 1.2.9. Исходя из получившихся результатов следует, что наибольшее значение

прочности (порядка 490 МПа) имеют алюминиевые сплавы типа 2024-T4 и 2024-T6b, при этом сплав 2024-T6b обладает наибольшим значением относительного удлинения.

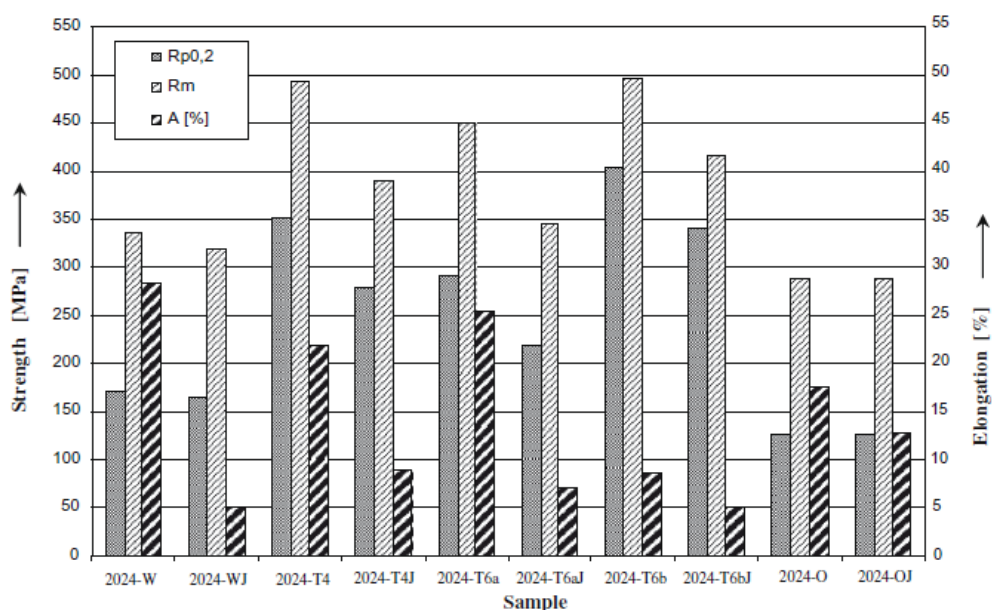


Рисунок 1.2.9 – Сравнение прочности алюминиевых сплавов после испытаний на растяжение [27].

Таким образом, можно однозначно утверждать, что сварка трением с перемешиванием обладает существенными преимуществами по сравнению со сваркой плавлением. При сварке трением с перемешиванием сохраняются свойства близкие к первоначальным, сварное соединение имеет меньший уровень остаточных напряжений и деформаций, отсутствуют негативные последствия термического воздействия такие, как выгорание компонентов сплава и увеличение размера зерна, достигаются высокие скорости сварки при больших объемах производства.

Процессы интенсивной пластической деформации оказывают влияние на формирование микроструктуры сварного шва, от которой зависят его прочностные свойства. Определяющим фактором являются температурно-временные условия, при которых реализуется процесс сварки трением с перемешиванием.



### 1.3 Сущность метода перемешивающей фрикционной обработки

Существует множество хорошо зарекомендовавших себя методов упрочнения материалов, применяемых для измельчения зерна. К ним относятся такие методы упрочнения как равноканальное угловое прессование, кручение под высоким давлением, многонаправленная ковка и т.д., в то время как фрикционная перемешивающая обработка относительно недавно вошла в этот список.

Фрикционная перемешивающая обработка является одним из основных методов модифицирования поверхности, который непосредственно изменяет микроструктурные особенности материала на поверхности. Данный вид обработки материалов способен улучшать такие свойства поверхности, как сопротивление истиранию, твердость, прочность, пластичность, коррозионную стойкость, усталостную долговечность и формуемость, не влияя на объемные свойства материала.

Первоначально ФПО использовалась для производства сверхпластичных алюминиевых сплавов со сверхмелкозернистым размером зерна и высокой разориентацией границ зерен. Позднее развитие ФПО привело к успешной поверхностной обработке сплавов меди, титана и стали. Метод фрикционной перемешивающей обработки продемонстрировал свою эффективность при гомогенизации алюминиевых сплавов, обработанных методом порошковой металлургии. Данный метод эффективно устраняет дефекты литья, разрушает или растворяет частицы второй фазы и приводит к значительному улучшению свойств материала [1–4].

Многочисленные исследования показали, что интенсивная пластическая деформация при ФПО является эффективным методом получения ультрамелкозернистых материалов [1–6,8-10]. Одним из существенных недостатков применяемых в настоящее время методов интенсивной пластической деформации является необходимость использования нескольких проходов для получения минимально возможного

размера зерна и достижения максимально возможной степени деформации. При этом во многих случаях, для того чтобы избежать растрескивания, требуется проводить промежуточные отжиги для снятия наклепа материала.

Результаты исследований поверхностных слоев, образовавшихся при ФПО, показывают, что в результате фрикционного нагрева и интенсивной пластической деформации материал в них сильно фрагментируется и может переходить в ультрамелкодисперсное состояние. Это приводит к изменению механизмов деформирования и влияет на дальнейшее поведение системы трения в целом [8,9].

Эволюция микроструктуры во время ФПО уникальна с динамически рекристаллизованной микроструктурой, имеющей большое количество большеугловых границ зерен [8–11]. Кроме того, большинство методов упрочнения изменяют объемные свойства материала. В тоже время эти методы в отличие от ФПО включает не только модификацию поверхности, но и имеют особенность изменять структуры и свойства основного материала.

Процесс фрикционной перемешивающей обработки состоит из постепенного перемещения твердого вращающегося инструмента - пина, который погружается в заготовку и затем перемещается в заданном ему направлении. Схематическое изображение ФПО показано на рисунке 1.3.1.

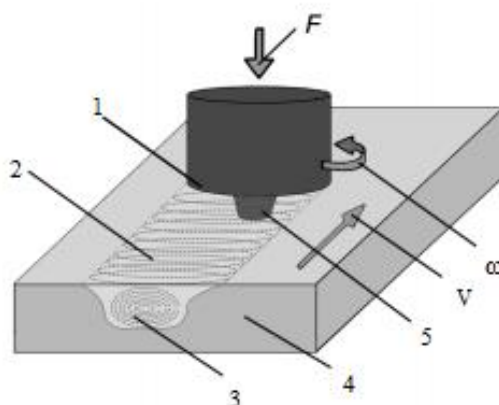


Рисунок 1.3.1 – Фрикционная перемешивающая обработка (ФПО).

Плечи СТП-инструмента 1 с рабочим пином 5 перемещается вдоль обрабатываемой заготовки 4 с определенной скоростью перемещения  $V$ . В результате равномерной прилагаемой нагрузки инструмента  $F$  и скоростью вращения плеч  $\omega$  происходит формирование двух зон перемешивания материала: первая зона материала – поверхностная 2, вторая зона материала – внутренняя 3. При этом каждой зоне происходит образование мелкозернистой равноосной структуры материала [11].

Фрикционная перемешивающая обработка применяется в современной науке разных стран во многих сферах материаловедческих исследований. Так, коллектив авторов института исследования металлов Китайской академии наук [28] исследовали влияние ФПО на свойства литого сплава Mg-Al-Zn. Отливка Mg-Al-Zn была подвергнута обработке трением с перемешиванием (ФПО) и последующему старению.

В результате фрикционная перемешивающая обработка привела к значительному разрушению и растворению крупной сетчатой эвтектической фазы  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ , распределенной по границам зерен, и значительному измельчению зерен ( $\sim 15$  мкм), тем самым значительно улучшив свойства отливки при растяжении (рисунок 1.3.2).

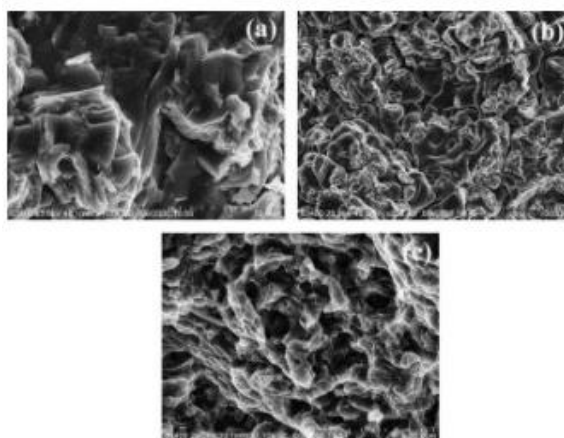


Рисунок 1.3.2 – СЭМ-изображения, показывающие поверхности излома образцов AZ91D: (а) и (б) в отливке и (в) в после ФПО [28].

После старения образец сплава показал значительно повышенный предел текучести и предел прочности на разрыв (177 и 337 МПа), а также пониженное удлинение (10%) из-за обширного непрерывного осаждения мелких частиц  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ .

Для достижения поставленной цели, а именно измельчения зерна промышленного алюминия 7075 Al, американские исследователи использовали комбинирующую технологию [30]. Так, комбинируя фрикционную перемешивающую обработку с быстрым охлаждением, были получены образцы с размером зерна 100, 180, 300 и 500 нм.

Зона однопроходной обработки трением с перемешиванием длиной 30 см была получена при скорости перемещения 120 мм / мин и скорости вращения 1000 об / мин. Смесь воды, метанола и сухого льда использовалась для закалки пластины сразу после ФПО. Скорость охлаждения контролировалась, регулируя объемный расход охлаждающей жидкости. В ходе эксперимента были выбраны четыре скорости охлаждения для создания зерен различного размера в полученной обработанной микроструктуре.

Макроизображения поперечного сечения, перпендикулярного направлению обработки показаны на рисунке 1.3.3.

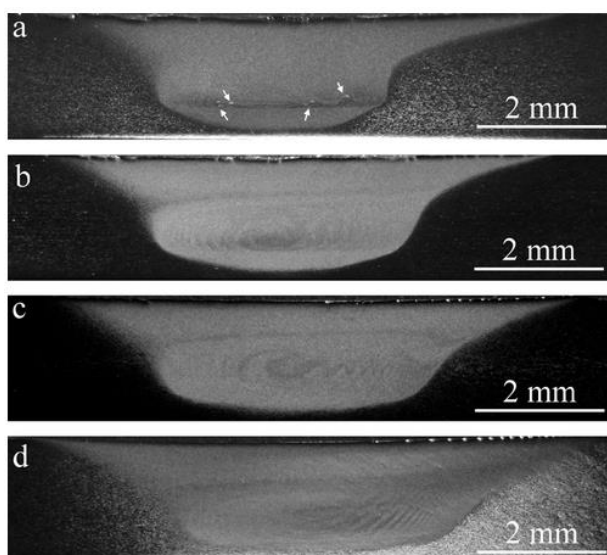


Рисунок 1.3.3 – Макроизображения поперечного сечения, перпендикулярного направлению обработки; из (a) образца А, (b) образца В, (c) образца С и (d) образца D [30].

По результатам исследования выяснилось, что нанокристаллические структуры, сформированные в образце, обработанном с максимальной скоростью охлаждения, состоят из зеренной структуры с преобладанием большеугловых границ и свободны от структур с дислокационными ячейками (рисунок 1.3.4).

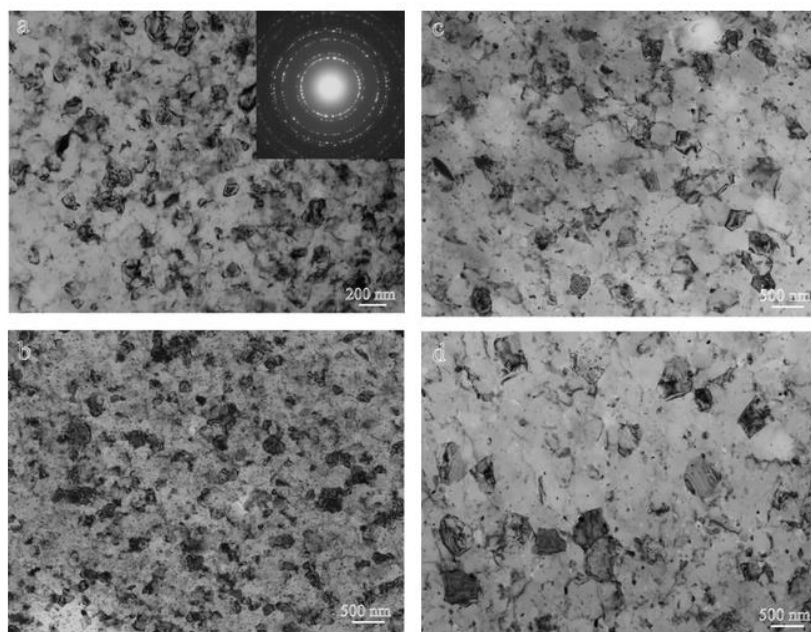


Рисунок 1.3.4 – Микрофотографии сплава 7075 Al после ПЭМ; (а) в образце А с соответствующей структурой SAD, (b) в образце В, (с) в образце С и (d) в образце D [30].

В крупных зернах образцов при более медленных скоростях охлаждения наблюдались дислокации и структуры возврата (рисунок 1.3.5).

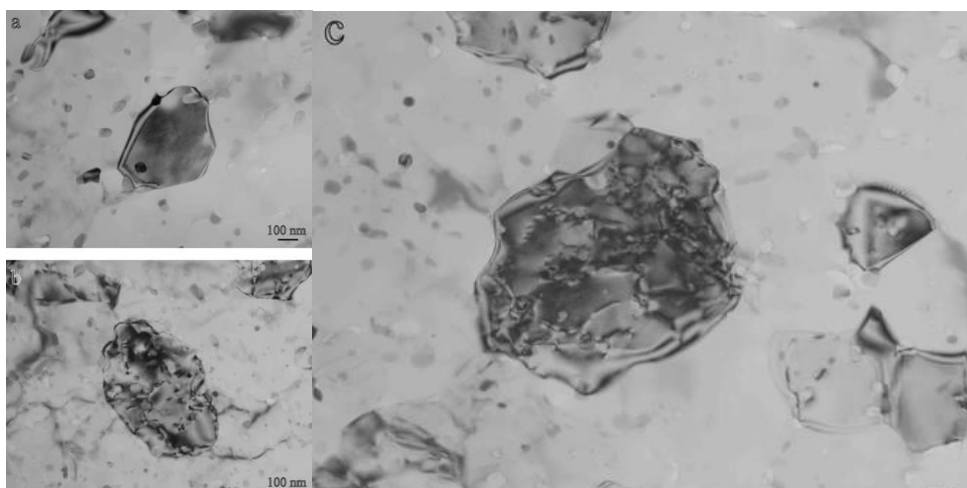


Рисунок 1.3.5 – Зерновые структуры в образцах: а - зерно без дислокаций, б - зерно с высоким уровнем внутренних напряжений и упругих искажений, с - зерно с содержанием дислокаций [30].

Образованные зерна являются результатом эволюции исходных нанокристаллов, сформированных вокруг булавочного инструмента при ФПО. Контролируя скорость охлаждения, происходит образование мелкозернистой структуры зерна порядка 100, 180, 300 и 500 нм. Дефекты обработки были обнаружены только в образце А, который испытал самую высокую скорость охлаждения. Для образцов с более медленным охлаждением (BD) зоны обработки демонстрируют высокую степень сплошности без дефектов, что свидетельствует о высоком качестве обработки.

Коллективу авторов «Института Физики Прочности и Материаловедения СО РАН» были исследованы механические свойства образцов алюминиевого сплава, полученных перемешивающей обработкой трением листового проката различной толщины [31].

В ходе исследования было определено, что при изготовлении образцов сплава АМг5 толщиной 5 и 10 мм, подвергнутых перемешивающей фрикционной обработке прочностные свойства образцов находятся на уровне прочности исходного материала. В зоне перемешивания происходит разрушение исходной структуры сплава с образованием ультрамелкозернистой зеренной структуры (рисунок 1.3.6).

При этом независимо от толщины исходных листов размер зерна в зоне перемешивания находится на уровне 5–10 мкм.

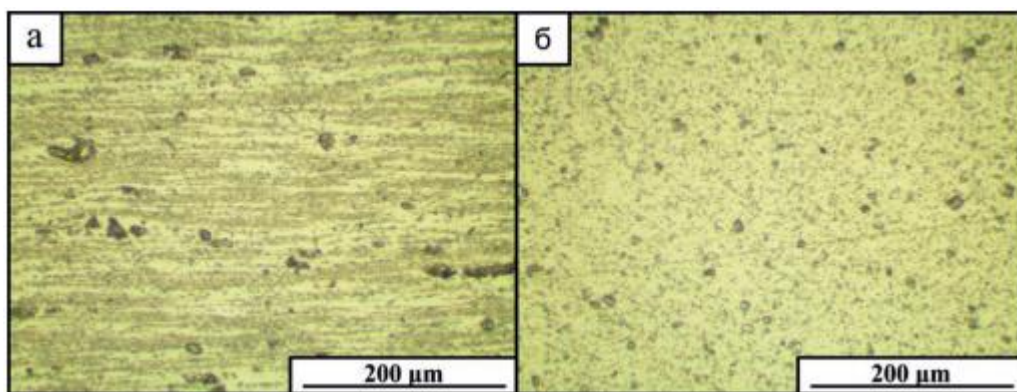


Рисунок 1.3.6 – Структура исходного материала(а) и зоны перемешивания(б) [31].

При этом, несмотря на практически одинаковые значения предела прочности для образцов, полученных из листов различной толщины, закономерности протекания процесса деформации данных образцов демонстрируют существенные отличия. Такое положение обусловлено условиями охлаждения материалов различной толщины, различными степенями рекристаллизации материала в зоне перемешивания и, как следствие, существенно отличающимися параметрами стадий деформационного упрочнения и картины изломов (рисунки 1.3.7,1.3.8).

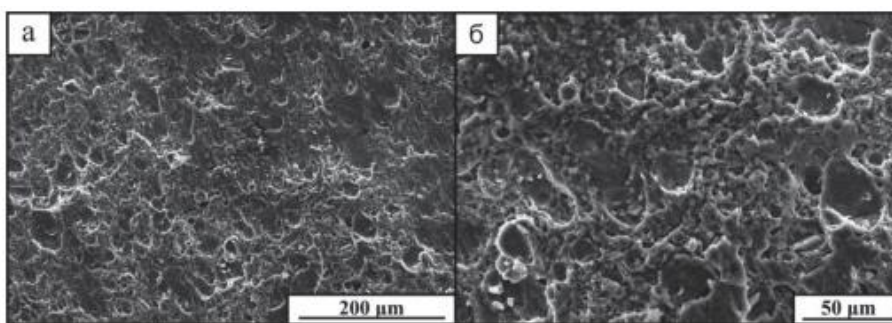


Рисунок 1.3.7 – Строение излома образца, полученного из листа сплава АМг5 толщиной 5 мм [31].

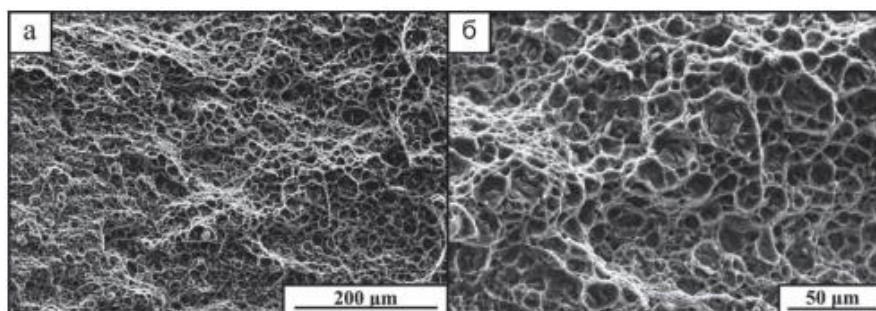


Рисунок 1.3.8 - Строение излома образца, полученного из листа сплава АМг5 толщиной 10 мм [31].

Проведенные исследования показывают, что изготовление образцов алюминиевых сплавов с ультрамелкозернистой структурой методом перемешивающей фрикционной обработки по прочностным характеристикам превосходят образцы исходного материала на величину до 10%.

Изменение режимов, характерных для изготовления образцов из листов проката различной толщины, ввиду различного инструмента и условий обработки, отличия в условиях отвода тепла от области перемешивания и др. приводят к тому, что, несмотря на практически одинаковый размер зерна, условия испытания и размер образцов, пластическая деформация и разрушение проходят по различным механизмам, что свидетельствует об отличиях в структурно-фазовом состоянии образцов, что должно учитываться при изготовлении деталей из ультрамелкозернистых материалов данным методом.

По результатам проведенного анализа можно утверждать, что технология ФПО является энергоэффективной, экологически чистой, универсальной технологией обработки материалов для получения мелкозернистой структуры материала, поверхностных и объемных композитов из различных алюминиевых сплавов, а также синтеза композиционных и интерметаллических соединений. При этом геометрия инструмента является очень важным фактором, влияющим на дисперсию частиц наряду с их направлением вращения инструмента и оказываемому усилию.



#### **1.4. Влияние модификаторов на структуру и механические свойства материалов, полученных методом фрикционной перемешивающей обработки**

Поверхностные свойства алюминиевых сплавов могут быть значительно улучшены за счет нанесения покрытий различных типов на подложку из алюминиевого сплава. Для улучшения свойств поверхности алюминия существуют такие методы, как физическое осаждение из газовой среды, твердое и жидкое анодирование, осаждение ионным пучком и др. Тем не менее, производимые этими методами покрытия слишком тонкие, чтобы выдержать приложенную высокую нагрузку, так как тонкая пленка легко разрушается при деформации подложки из алюминиевого сплава. Кроме того, эти методы являются дорогостоящими, трудоемкими и неэкологичными из-за их дорогостоящих расходных материалов, длительного времени обработки и токсичных выбросов. Также существуют методы упрочнения поверхности методом образования поверхностного слоя, состоящего из композиционного материала с металлической матрицей, армированной керамическим или интерметаллическим наполнителем, на алюминиевой подложке. На данный момент для получения композиционных материалов с металлической матрицей на основе алюминиевых сплавов были использованы различные техники, в том числе лазерная наплавка [32], плазменное напыление [33] и микродуговое окисление [34]. Метод лазерной наплавки включает плавление металла, которое может вызвать несколько дефектов, таких как растрескивание, пористость, анизотропия структуры и состава, увеличение балла зерна, рост дендритных кристаллов и образование нежелательных фаз из-за межфазной реакции между арматурой и металлической матрицей. При использовании методов плазменного напыления или микродугового окисления существует возможность получения низких значений адгезии между поверхностным композитным

слоем и основным материалом, прочность межфазного сцепления ограничена. Преодоление негативных аспектов вышеописанных методов по сей день является одним из основных направлений развития данных технологий.

Фрикционная перемешивающая обработка относительно новая технология твердотельной модификации поверхности, этот метод широко применяется в обработке металлических материалов с целью изменения микроструктуры поверхности. Кроме того, в различных исследованиях уже была продемонстрирована эффективность этого способа введения армирующих частиц в металлическую матрицу для получения композиций как на поверхности материала, так и в его объёме благодаря использованию инструментов различных конфигураций. Для изготовления модификации поверхности данным методом в обрабатываемом материале подготавливаются отверстия или пазы в зоне обработки, заполняемые армирующими частицами (рисунок 1.4.1).

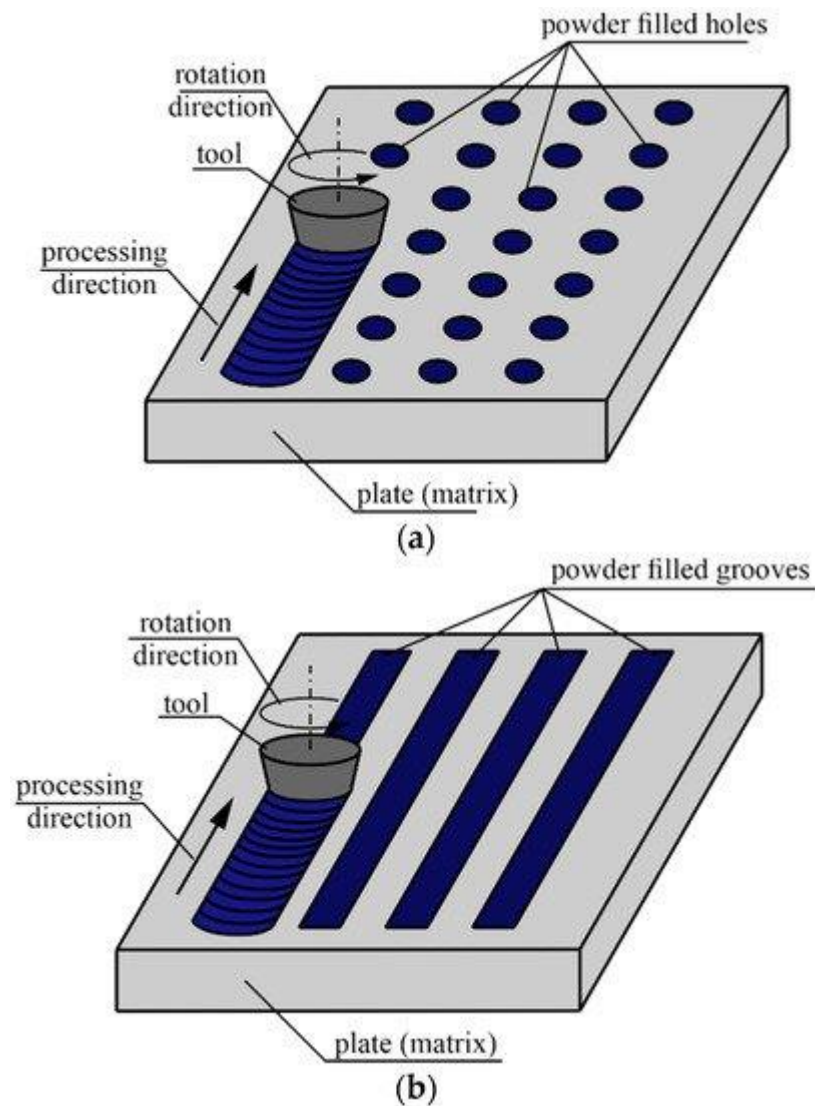


Рисунок 1.4.1 – Методы заполнения листового материала армирующим компонентом при ФПО: а) метод заполнения отверстиями; б) метод заполнения продольными пазами [35].

Для заполнения металла при ФПО методом отверстий на обрабатываемой зоне сверлятся глухие отверстия одинаковой периодичностью. Диаметр, глубина и количество отверстий рассчитываются исходя из целей производства для получения необходимого объёмного содержания модификатора. Метод заполнения пазами по своей сути не сильно отличается от метода заполнения отверстиями. Основной отличительной чертой данного метода является то, что вместо множества отверстий в заготовке подготавливается один продольный паз, что может

упростить обработку фрикционным перемешиванием в массовом производстве.

После наполнения отверстий или пазов армирующим компонентом нерасходуемый вращающийся инструмент с пином и плечами погружаются в заготовку и проходят вдоль пазов или отверстий. Теплота трения, возникающая между инструментом и заготовкой смягчают материалы вокруг инструмента, и сочетание вращения и перемещения инструмента позволяет достичь текучести материала, таким образом, приводит к однородному смешиванию армирующего компонента и основного металла, окончательно формируя композит с металлической матрицей. Исходя из характеристик и правил подготовки и модификации поверхности методом фрикционной перемешивающей обработки, можно выделить следующие положительные стороны процесса:

1) Весь процесс подготовки является энергосберегающим, экологичным и экономичным;

2) Низкая температура обработки с коротким термическим циклом ниже температуры плавления алюминиевых сплавов, позволяет избежать дефектов, связанных с плавлением металла и ограничить межфазную реакцию между армирующим компонентом и алюминиевой матрицей;

3) Толщина композитного слоя может быть дополнительно отрегулирована с помощью изменения конфигурации инструмента, параметров процесса и методов введения армирующих частиц, благодаря чему глубина модифицированного слоя может достигать нескольких миллиметров;

4) Высокая адгезия модифицированного слоя и металлической подложки, позволяющая избежать отслоения поверхностных слоёв от основного металла.

В качестве армирующего компонента во время фрикционной перемешивающей обработки могут быть использованы твердые керамические частицы, такие как SiC [36] и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [37] и углеродные

наноматериалы, такие как графит [38] и углеродные нанотрубки [39]. Композиты, усиленные данным частицами, имеют несколько недостатков таких, как большая разница между коэффициентами теплового расширения включений и алюминиевой матрицы и их высокая хрупкость.

В качестве армирующих компонентов также можно рассмотреть интерметаллидные соединения. Интерметаллиды имеют низкую плотность, высокий модуль упругости и температуру плавления [40]. Также, интерметаллиды имеют КТР гораздо ближе к алюминиевой матрице и более пластичны по сравнению с рассмотренными выше неметаллическими включениями. Следовательно, использование интерметаллидных частиц в качестве наполнителя является перспективным направлением технических разработок. Из всего многообразия интерметаллидных соединений интерметаллиды на основе алюминия выделяют множество положительных свойств, таких как отличная износостойкость, высокая твердость и стабильность при повышенных температурах. Исходя из вышесказанного, наполнение алюминия металлическими модификаторами является перспективной идеей в качестве научной разработки.

В настоящее время существует два способа получения алюминиевых композитов, модифицированных металлическими частицами методом ФПО: прямой и косвенный (непрямой). Первый способ заключается в заполнении алюминиевой матрицы порошками интерметаллидов напрямую, второй – в образовании интерметаллидных соединений непосредственно в процессе фрикционного перемешивания. Косвенный способ модифицирования имеет ряд преимуществ по сравнению с прямым. Композиты, изготовленные непрямым методом, имеют более однородную микроструктуру, а также более стабильны термодинамически. В частности, межфазные реакции между армирующим компонентом и алюминиевой матрицей обеспечивают металлургическую связь между ними, позволяя передавать нагрузку через границу раздела армирующий компонент / матрица, что, как предполагается, является важным для получения превосходных трибологических свойств

[40]. Као и его сотрудники успешно использовали косвенный метод ФПО для получения алюминий-матричных композитов Al–Al<sub>2</sub>Cu [41], Al–Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub> [42] и Al–Al<sub>3</sub>Ti [43]. Для этого были использованы соответствующие порошки алюминия с медью, железом и титаном. Порошки были смешаны и подвергнуты горячему прессованию для образования объемной заготовки. После этого была произведена фрикционная перемешивающая обработка для образования композитов с алюминиевой матрицей, армированных интерметаллическими частицами.

В последние годы некоторые исследования также сообщают о возможности фазовых превращений во время ФПО. Ходабахши и др. [44] модифицировали алюминиево-магниевый сплав 5052 с помощью титанового порошка с средним диаметром частиц порядка 40 мкм. Они использовали заполнение с помощью продольных пазов и для гомогенизации произвели четыре прохода ФПО. Результаты их исследования показали, что частицы титана взаимодействуют с подложкой из алюминия с образованием Al<sub>3</sub>Ti. Также Ходабахши и др. [45] использовали тот же метод для изготовления гибридных интерметаллических композитов (Al<sub>3</sub>Ti / MgO) с армированной поверхностью на основе системы Al–Mg–TiO<sub>2</sub>. Данный метод ФПО имеет некоторые преимущества перед методом, который использовали Као и др. Благодаря данному способу, пропадает необходимость этапов консолидации и спекания перед фрикционной перемешивающей обработкой. Этот факт может быть важным для массового производства, так как он позволяет экономить время и электроэнергию.

Медь является одним из наиболее перспективных элементов, добавляемых в алюминий для формирования армирующих фаз на месте из-за её низкой стоимости и высокой износостойкости интерметаллидов Al–Cu. На данный момент произведено относительно мало исследований на тему АМК, армированных частицами интерметаллидов системы Al–Cu методом ФПО [41,46]. В этих исследованиях методом ФПО были получены интерметаллические армирующие частицы Al<sub>2</sub>Cu, а также было произведено

исследование влияния этих частиц на структуру и свойства материала. Интересным фактом является то, что в данных исследованиях образуются только интерметаллиды типа  $Al_2Cu$ , но в этих работах [41,46] не была указана причина данной особенности межфазовых превращений, кроме того, имеется ограниченная информация об износе.

Таким образом в исследованиях Хуанга и др. [47] с помощью пяти проходов фрикционной перемешивающей обработки были получены образцы алюминия 1060, модифицированных медным порошком. В результатах данного исследования демонстрируется рентгенограмма образца, показывающая наличие интерметаллидных соединений  $Al_2Cu$  в составе композиции (рисунок 1.4.2). Образование интерметаллидов типа  $Al_2Cu$  было обосновано наименьшей энергией Гиббса данной фазы системы Al–Cu. При этом композиты продемонстрировали значительное повышение твёрдости в несколько раз  $\sim 75$  HV при твёрдости алюминия в исходном состоянии  $\sim 24$  HV.

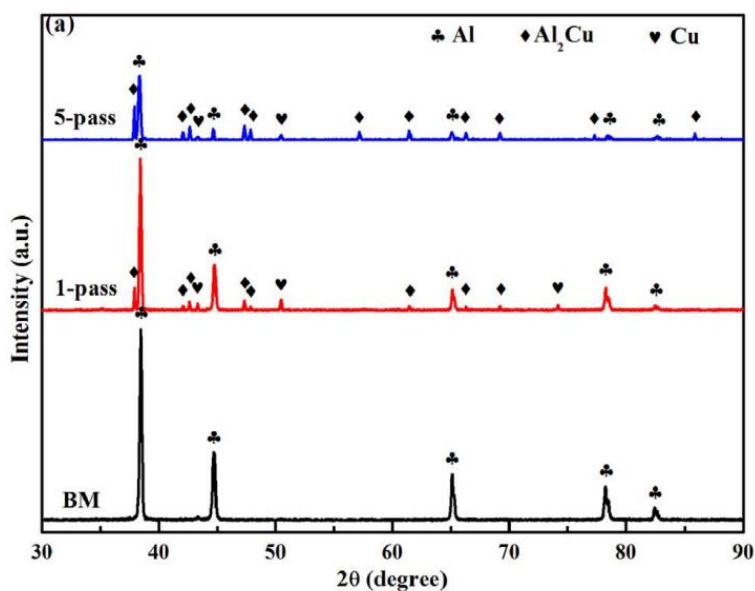


Рисунок 1.4.2 – рентгенограмма композиции Al–Cu, полученной методом ФПО [47].

## 2. Объект и метод исследования

### 2.1 Оборудование и материалы

В ходе исследования методом фрикционной перемешивающей обработки были получены образцы инструментом с пином квадратного сечения и инструментом с винтовым пином на экспериментальном оборудовании в Институте физики прочности и материаловедения (рисунок 2.1.1).



Рисунок 2.1.1 - Экспериментальное оборудование для фрикционной перемешивающей обработки/сварки ИФПМ СО РАН

Обработку проводили при скорости вращения инструмента от 500 об/мин и скорости подачи 90 мм/мин. Сила прижима инструмента к материалу заготовки составляла до 1350 кг. Обработку осуществляли от одного - до четырех проходов инструментом по одной и той-же области.



Управление положением инструмента по вертикальной оси при обработке осуществлялось по нежёсткой схеме с поддержанием постоянной нагрузки.

В цикл работ по фрикционной перемешивающей обработке входили также исследований параметров процесса для упрочнения алюминиево-кремниевых сплавов. По этой причине часть образцов получена инструментом с поверхностью, загрязненной алюминиево-кремниевым сплавом.

Структурные исследования проводились на металлографическом цифровом микроскопе Альтами МЕТ 1С, представленном на рисунке 2.1.2.



Рисунок 2.1.2 - Металлографический цифровой микроскоп Альтами МЕТ 1С

Механические испытания образцов, вырезанных вдоль линии обработки, проводили на универсальной испытательной машине УТС110-М (рисунок 2.1.3).



Рисунок 2.1.3 - Универсальная испытательная машина UTC110-M

Данные микротвердости по Виккерсу получены на микротвердомере Duramin 5 (рисунок 2.1.4).



Рисунок 2.1.4 – Микротвердомер Duramin 5

## 2.2 Методика проведения эксперимента

При обработке сплава АМг5 инструментом с различной конфигурацией пина после обработки тем-же инструментом образцов сплава АК12 параметры процесса обработки, подобранные ранее, не соответствовали формированию бездефектных обработанных структур. При этом, дефекты строения зоны обработки существенно различались.

Для образцов, обработанных инструментом с пином квадратного сечения, характерно наличие неоднородностей строения, чередующихся каждые несколько слоёв (рисунок 2.2.1).

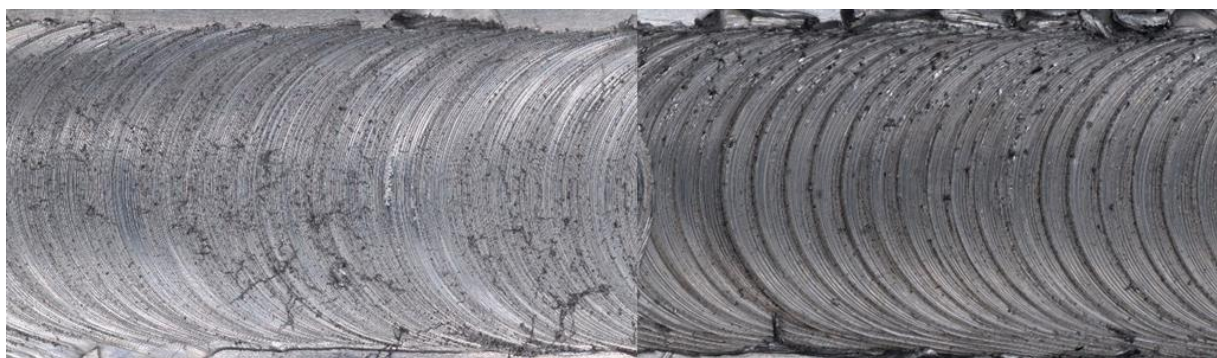


Рисунок 2.2.1 - Внешний вид поверхности зоны обработки инструментом сплава АМг5 после фрикционной перемешивающей обработки инструментом с пином квадратного сечения

Для образцов, полученных инструментом с винтовым пином неоднородности строения зоны обработки не выражены, и основным формируемым дефектом являлось заглобление инструмента в процессе обработки при постоянной нагрузке (рисунок 2.2.1).



Рисунок 2.2.1 - Внешний вид поверхности зоны обработки инструментом сплава АМг5 после фрикционной перемешивающей обработки инструментом с винтовым пином

Обработка инструментом квадратного сечения с попыткой изменения параметров процесса получения образцов (усилие нормального давления в пределах 1050-1350 кг) не привело к ожидаемому результату. Неоднородности обработки образцов (точки а1-а5 и др. на рисунке 2.2.3) имеют регулярно повторяющееся строение и представлены материалом, выдавленным из зоны обработки таким образом, что процесс формирования образцов представляется имеющим помимо оси вращения инструмента - оси прецессии.

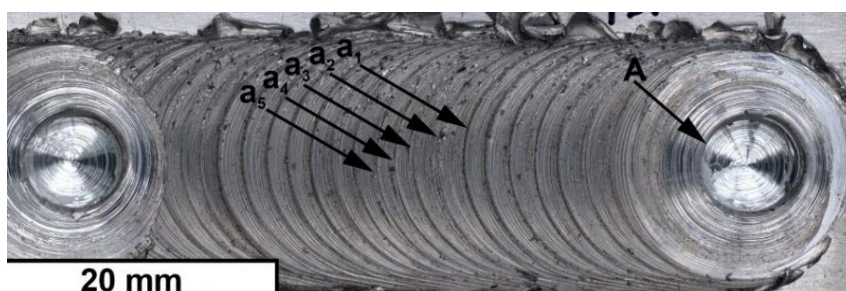


Рисунок 2.2.3 - Строение зоны перемешивания образцов после обработки инструментом с пином квадратного сечения с наличием избыточных неоднородностей на поверхности

Прецессирование, в свою очередь, указывает на нестабильность формирования и разрушения адгезионных связей инструмента и материала в

процессе обработки, что при учете нежесткой схемы управления координатой инструмента по вертикальной оси вполне ожидаемо.

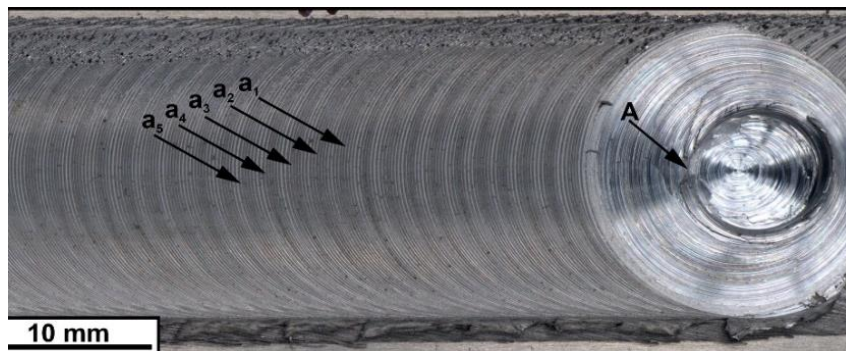


Рисунок 2.2.4 - Строение зоны перемешивания образцов после обработки инструментом с пином квадратного сечения

Предположительно такой эффект связан с наличием на поверхности инструмента налипшего материала алюминиево-кремниевого сплава АК12, что приводит к разрушению адгезионных связей между сплавом АМг5 и инструментом и приводит к проявлению неоднородностей процесса обработки, что, в свою очередь, частично подтверждается снижением дефектности строения при обработке после частичного истирания с поверхности инструмента сплава АК12 (точки a1-a5 на рисунке 2.2.4).

Строение зоны перемешивания со структурой из концентрических колец (при обработке инструментом с винтовым пином), или со структурой из неоднородных слоёв близкой к прямоугольной формы (при обработке инструментом с пином квадратного сечения) обусловлено послойным характером процесса формирования соединения. Это происходит посредством выдавливания металла из зоны перед инструментом - в область за инструментом через точку с отступающей стороны соединения и адгезионным переносом металла за счет силы трения инструмента и обрабатываемого металла.

### 2.3 Проведение исследований макроструктуры образцов сплава АМг5, полученных фрикционной перемешивающей обработкой инструментом различной конфигурации

Для определения макроструктуры полученных образцов использовался металлографический цифровой микроскоп Альтами МЕТ 1С. Травление образцов осуществлялось в реагенте Келлера.

На рисунках 2.3.1-2.3.4 представлена макроструктурная зона после 4-х проходной обработки пином квадратного сечения.



Рисунок 2.3.1 - Макроструктура сплава АМг5 после 1 прохода квадратным ПИНОМ



Рисунок 2.3.2 - Макроструктура сплава АМг5 после 2 прохода квадратным ПИНОМ



Рисунок 2.3.3 - Макроструктура сплава АМг5 после 3 прохода квадратным  
ПИНОМ



Рисунок 2.3.4 - Макроструктура сплава АМг5 после 4 прохода квадратным  
ПИНОМ

Исходя из получившихся изображений можно сделать вывод о том, что наиболее крупные зерна будут находиться в зоне термического и термомеханического влияния. В зоне ядра шва размер зерен становится значительно меньшим и составляет порядка 1-1,5 мкм. Наличие дефектных зон не выявлено.

Исследования макроструктуры поверхности образцов после обработки винтовым пином проводились аналогичным образом. На рисунках 2.3.5-2.3.8 показана макроструктура сплава АМг5 после 4-х проходной обработки пином винтового сечения.



Рисунок 2.3.5 - Макроструктура сплава АМг5 после 1 прохода винтовым  
ПИНОМ

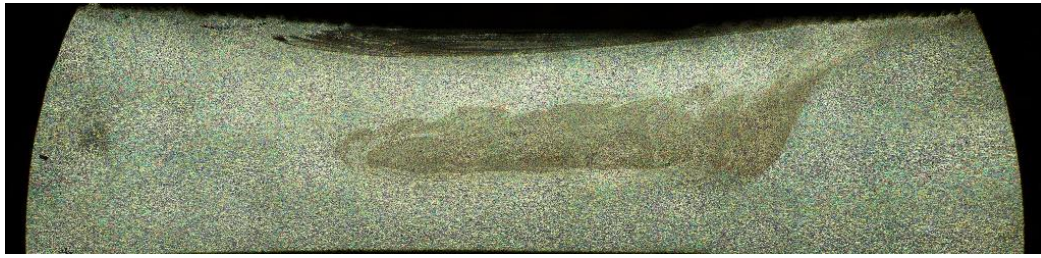


Рисунок 2.3.6 - Макроструктура сплава АМг5 после 2 прохода винтовым  
ПИНОМ

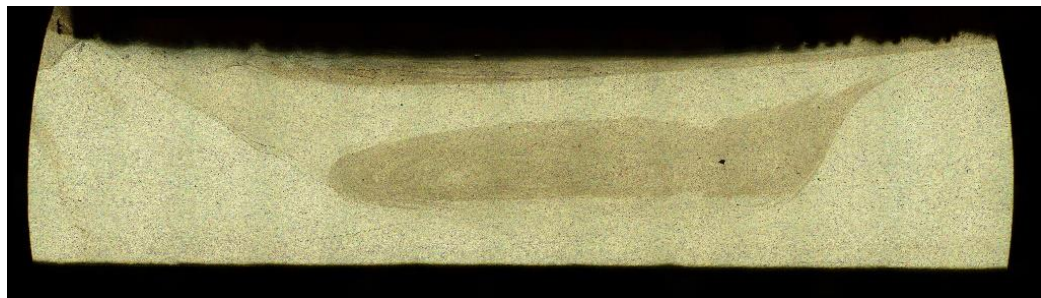


Рисунок 2.3.7 - Макроструктура сплава АМг5 после 3 прохода винтовым  
ПИНОМ

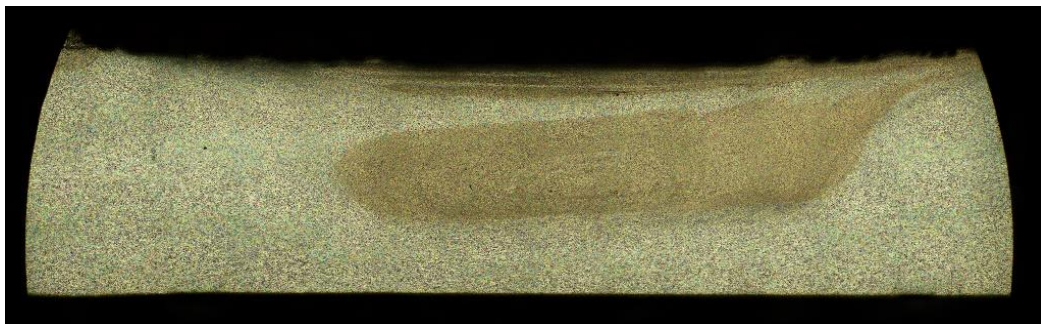


Рисунок 2.3.8 - Макроструктура сплава АМг5 после 4 прохода винтовым  
ПИНОМ

Также, как и при обработки квадратным наконечником на границе перехода одной зоны в другую наблюдается уменьшение размера зерна от ЗТВ к центру перемешивания шва. При этом видно, что с увеличением количества проходов инструмента, зона перемешивания шва становится более выраженной. В зоне ядра шва размер зерен также составляет порядка 1-1,5 мкм. Наличие дефектных зон не наблюдается.



## 2.4 Исследование влияния конфигурации инструмента для фрикционной перемешивающей обработки на механические свойства материала зоны перемешивания

Для обработки материала поверхности образцов использовалось 2 вида инструмента – пин винтового и квадратного сечения (рисунок 2.4.1).



Рисунок 2.4.1 – Инструменты ФПО с винтовым и квадратным пином

Механические свойства полученных образцов определялись зависимостью прочности и пластичности от режима обработки. Параметры режимов представлены в таблице 2.4.1.

Таблица 2.4.1 – Параметры режимов обработки образцов сплава АМг5

Режим	Инструмент*	Скорость подачи, мм/мин	Нагрузка на инструмент, кг				Скорость вращения инструмента, об/мин			
			1 пр.	2 пр.	3 пр.	4 пр.	1 пр.	2 пр.	3 пр.	4 пр.
№1	sq. 3.6.6	90	1120	1120	1120	1050	550	500	450	500
№3	sq. 3.6.6.	90	1200	1200	1100	1000	450	400	400	400
№4	sq. 3.6.6	90	950	950	900	900	400	400	400	400
№9	st. 3 mm	90	1300	1250	1250	1250	500	500	500	500

№10	st. 3mm	90	1300	1250	1250	1250	500	500	500	500
№1*	sq.10.10.5	90	2500	—	—	—	550	—	—	—
№2*	sq.10.10.5	90	2300	—	—	—	600	—	—	—

На рисунке 2.4.2 представлена сводная диаграмма зависимости относительного удлинения от деформации сплава АМг5.

Режим st. 3mm соответствует режиму обработки винтовым пином на 3 мм глубины обработки; режим sq. 3.6.6 соответствует режиму обработки пином квадратного сечения на 3 мм глубины обработки; режим sq.10.10.5 соответствует режиму обработки пином квадратного сечения на 5 мм глубины обработки.

Предел прочности материала остаётся на уровне предела прочности листового проката, и при обработке в 1-4 прохода существенно не изменяется. Обработка инструментом с квадратным пином приводит к формированию зоны перемешивания с несколько большими значениями предела прочности, но отличия в данном случае несущественны.

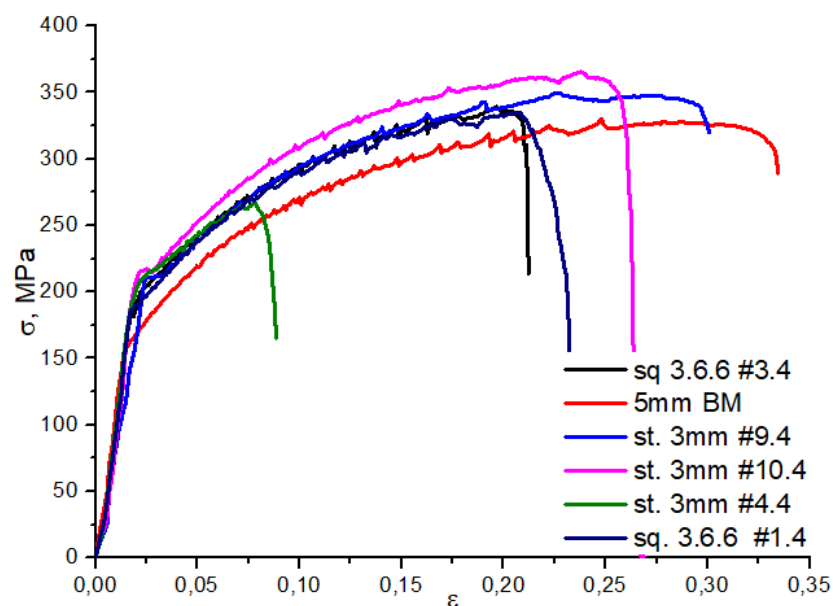


Рисунок 2.4.2 - Сводная диаграмма зависимости относительного удлинения от деформации сплава АМг5

На рисунке 2.4.3 представлен график зависимости прочности от режима в сплаве АМг5. По графику видно, что материал, обработанный пином винтовым сечения, имеет более высокую прочность (порядка 10-15%) нежели образцы, полученные при обработке квадратным пином. В целом же прочность образцов будет находится примерно на уровне основного металла (ВМ).

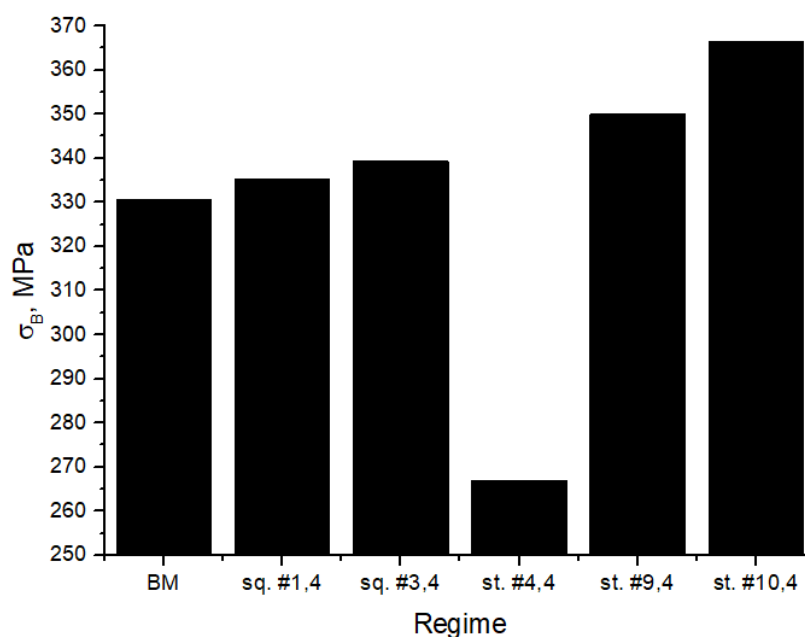


Рисунок 2.4.3 - График зависимости прочности от режима в сплаве АМг5

График зависимости пластичности материала от режима в сплаве АМг5 представлен на рисунке 2.4.4. По графику видно, что наибольшей пластичностью будет обладать основной материал. Обработка материала винтовым пином приводит к снижению относительного удлинения порядка 5 – 10%. Материал, обработанный пином квадратного сечения, теряет относительное удлинение порядка 15- 20 % от основного металла.

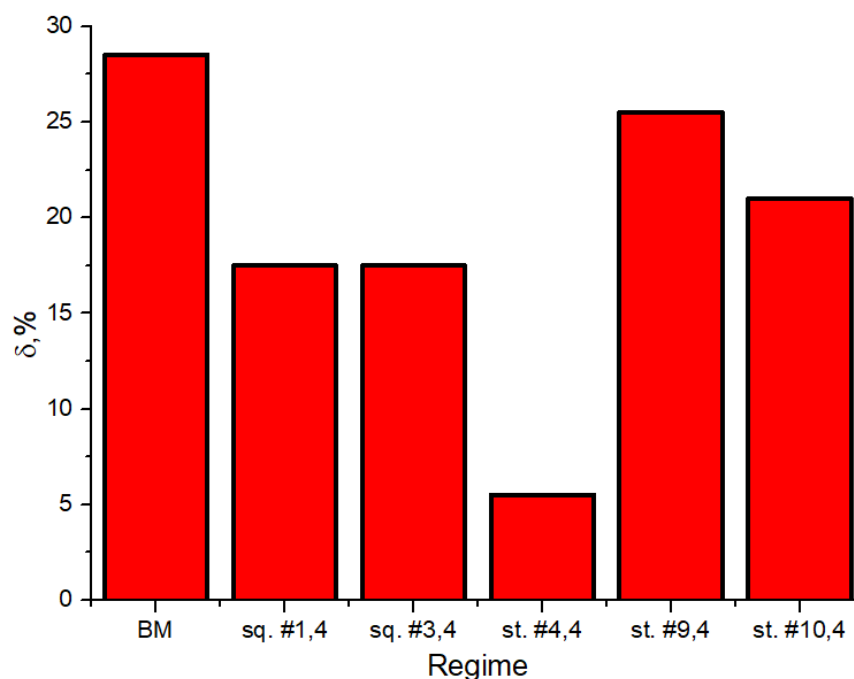


Рисунок 2.4.4 - График зависимости пластичности материала от режима в сплаве АМг5

Полученный результат показывает, что обработка инструментом с пином квадратного сечения приводит к снижению относительного удлинения после деформации порядка 15%. При этом значения предела прочности материала находятся на уровне листового проката. В следствии этого не происходит существенного разупрочнения материала после обработки.

## **2.5 Исследование влияния конфигурации инструмента для фрикционной перемешивающей обработки на микротвердость зоны перемешивания**

Для определения микротвердости по Виккерсу использовался микротвердомер Duramin 5. Микротвердость определялась в образцах, полученных обработкой пином квадратного и винтового сечения в зависимости от количества проходов. Основные параметры измерения представлены в таблице 2.5.1.

Таблица 2.5.1 – Параметры измерения микротвердости на микротвердомере Duramin

Нагрузка, г	Время выдержки, с	Шаг, мм
50	12	0,25

На рисунках 2.5.1-2.5.4 показаны графики зависимости микротвердости от расстояния в исследуемых образцах, полученных обработкой квадратным пином.

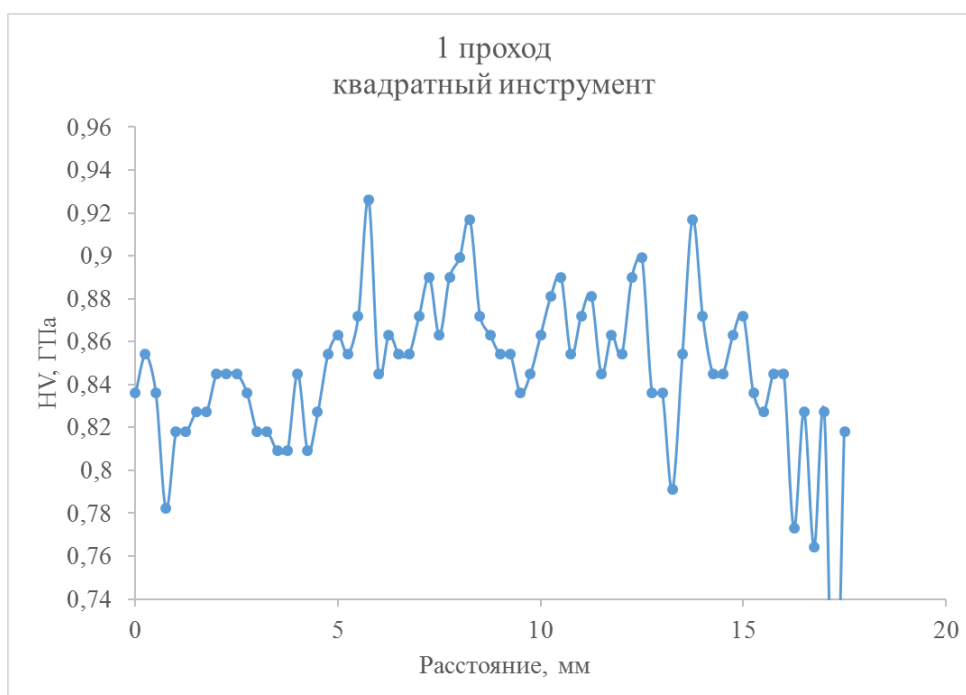


Рисунок 2.5.1 – График зависимости микротвердости HV от расстояния после первого прохода инструментом квадратного сечения

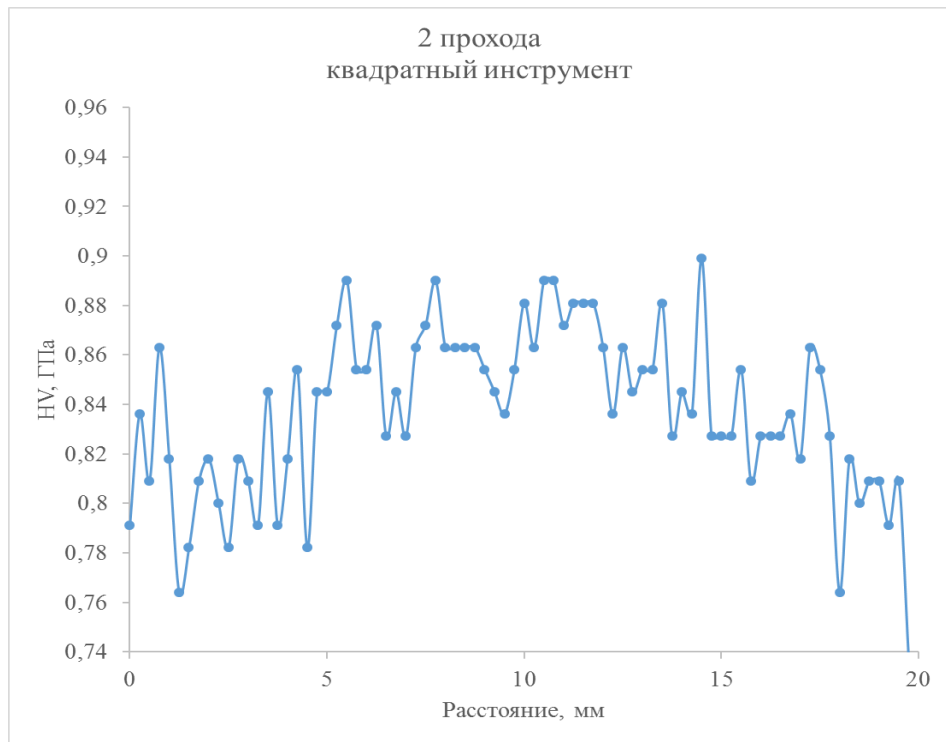


Рисунок 2.5.2 – График зависимости микротвердости HV от расстояния после второго прохода инструментом квадратного сечения

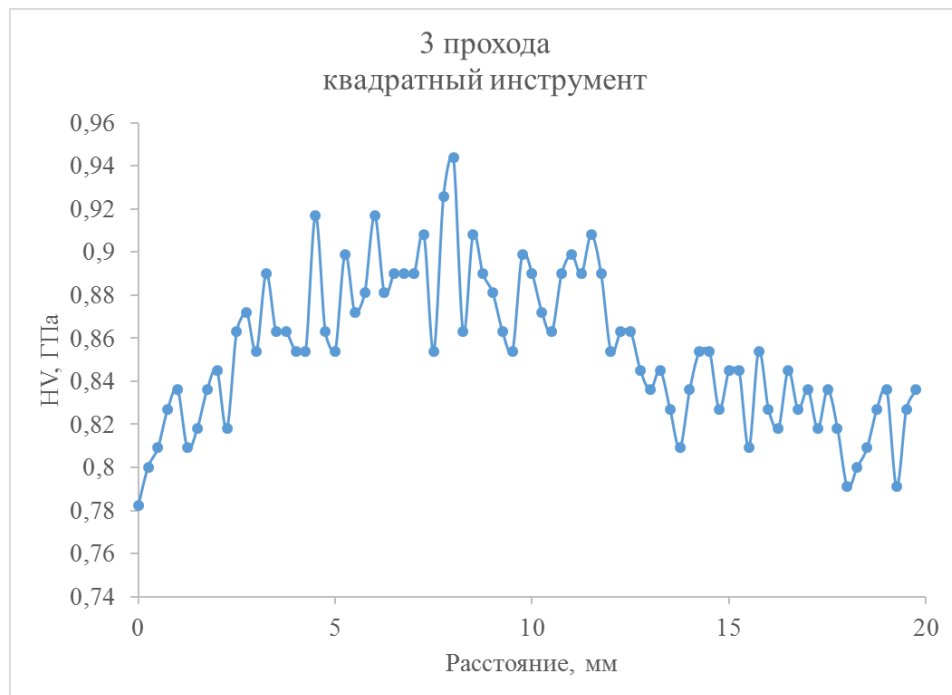


Рисунок 2.5.3 – График зависимости микротвердости HV от расстояния после третьего прохода инструментом квадратного сечения

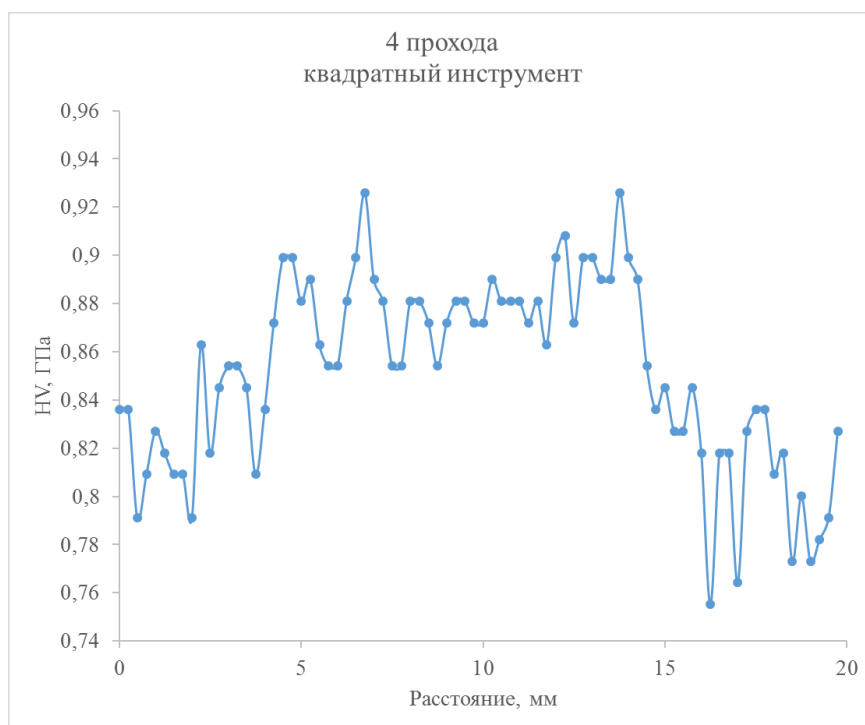


Рисунок 2.5.4 – График зависимости микротвердости HV от расстояния после четвертого прохода инструментом квадратного сечения

На рисунках 2.5.5-2.5.8 показаны графики зависимости микротвердости от расстояния в исследуемых образцах, полученных обработкой винтовым пином инструмента.

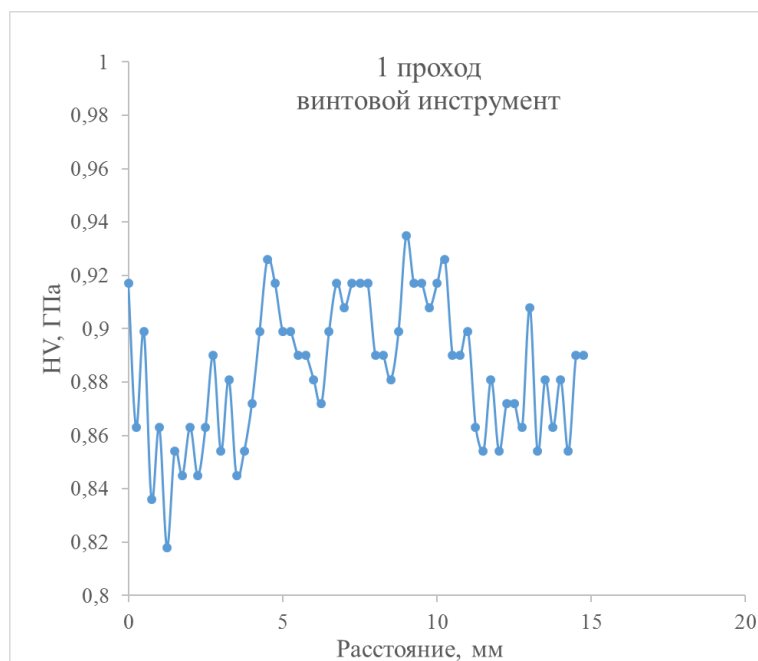


Рисунок 2.5.5 – График зависимости микротвердости HV от расстояния после первого прохода инструментом винтового сечения

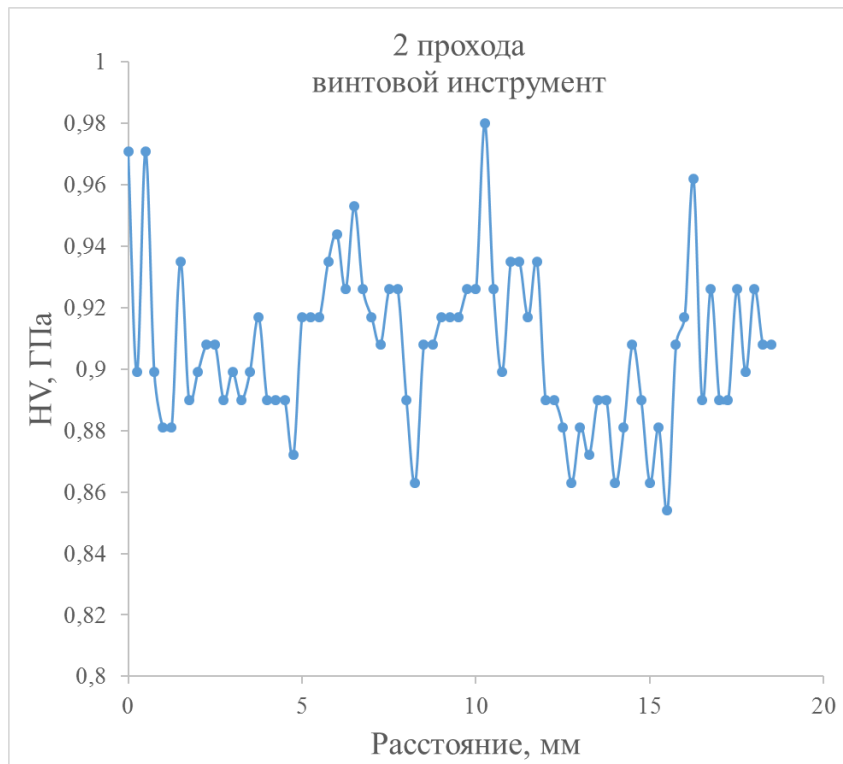


Рисунок 2.5.6 – График зависимости микротвердости HV от расстояния после второго прохода инструментом винтового сечения

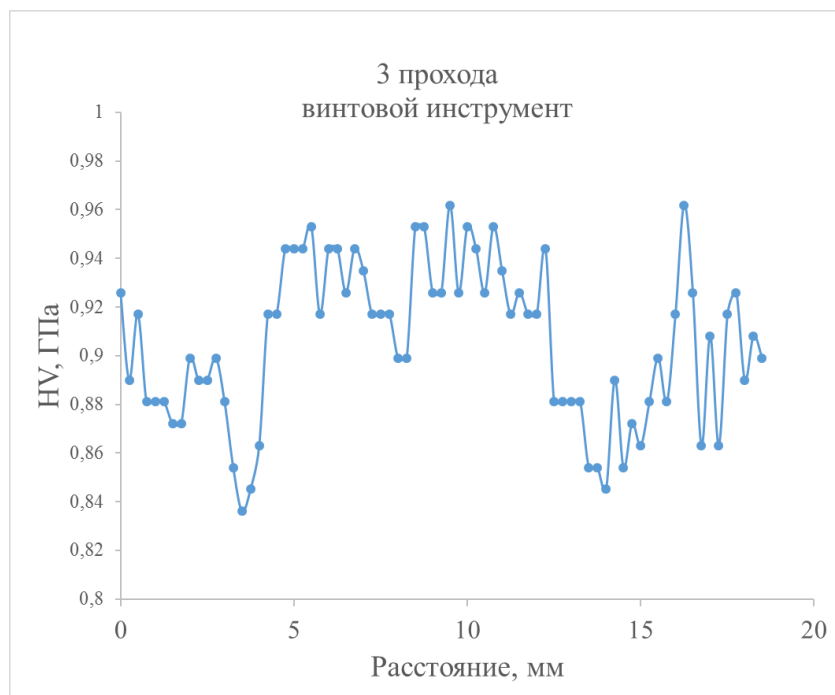


Рисунок 2.5.7 – График зависимости микротвердости HV от расстояния после третьего прохода инструментом винтового сечения



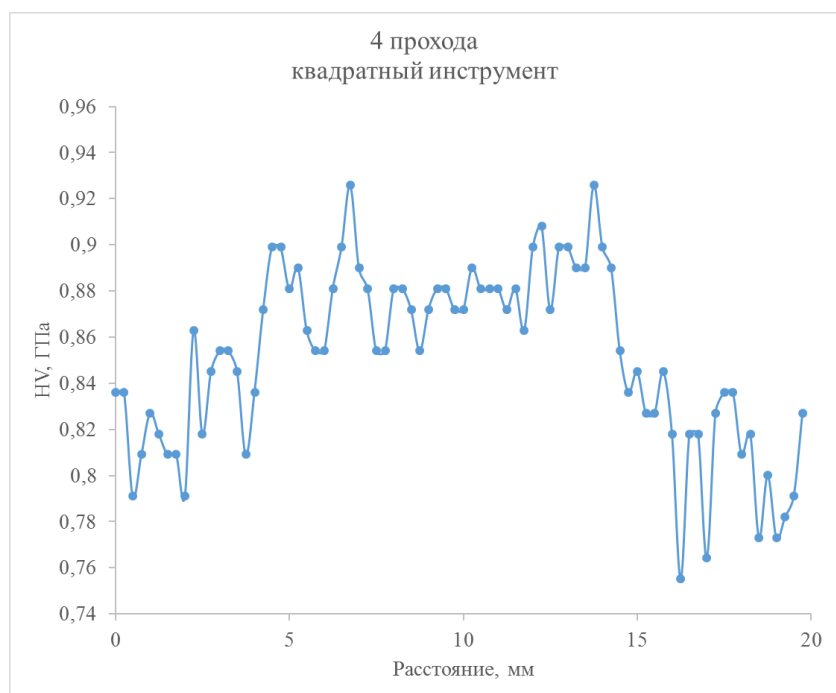


Рисунок 2.5.8 – График зависимости микротвердости HV от расстояния после четвертого прохода инструментом винтового сечения

При подробном анализе графиков можно сделать вывод, что среднее значение микротвердости в полученных образцах находится в пределах 0,8-0,88 ГПа что соответствует ожидаемым результатам. В зоне перемешивания наблюдается тенденция к увеличению показателей до 0,94 ГПа. Такая тенденция объясняется тем, что в зоне перемешивания металла будет образовываться мелкозернистая структура посредством обработки инструмента.

В полученных результатах необходимо учитывать определенную погрешность. Она будет формироваться исходя из того, что сплав АМг5 при оптическом исследовании образцов после травления склонен к образованию интерметаллидных соединений. Поэтому зона исследования пирамидального отпечатка может попадать именно в области интерметаллидных фаз, что будет немного исказить картину микротвердости.

## **Выводы**

Проведенные исследования показывают, что влияние формы пина инструмента на процесс обработки может сказываться в различной устойчивости инструмента к наличию на поверхности загрязнений от обработки других алюминиевых сплавов.

В то время, как инструмент с пином квадратной формы имеет тенденцию к проявлению нестабильностей движения при обработке с «прецессией» оси вращения, инструмент с винтовым пином проявляет склонность к повышенному образованию грата и заглублиению в материал. Структура металла в зоне обработки при оптимальном соотношении параметров процесса обработки представлена бездефектным строением, со средним размером зерна менее 1-2 мкм.

Механические свойства материала образцов, полученных без существенных неоднородностей процесса обработки, находятся на уровне свойств основного металла.

Полученные значения микротвердости в зоне перемешивания и в зоне термического и термомеханического влияния отличаются незначительно, в среднем параметры соответствуют 0,9 ГПа.

Таким образом, можно установить, что проведение фрикционной перемешивающей обработки инструментами с винтовым пином и с пином квадратного сечения, не приводит к разупрочнению материала и потенциально подходит для получения металломатричных композитов за счет замешивания различных порошковых частиц в объем алюминиевого сплава.

### 3 Заключение

В ходе данного исследования с помощью технологии фрикционной перемешивающей обработки были получены образцы алюминиевого сплава АМг5, модифицированного инструментами различной конфигурации. По результатам ФПО, металлографической микроскопии и механических испытаний на разрывной машине были выявлены следующие закономерности:

1. Влияние формы пина инструмента на процесс обработки является существенным. Инструмент с пином квадратной формы имеет тенденцию к проявлению нестабильностей движения при обработке с «прецессией» оси вращения, а инструмент с винтовым пином проявляет склонность к повышенному образованию грата и заглоблению в материал при отклонении параметров режимов от оптимальных значений.

2. Структурно-фазовые взаимодействия в материале в процессе обработки приводят к необходимости управления параметрами режимов.

3. Полученные значения микротвердости в зоне перемешивания и в зоне термического и термомеханического влияния отличаются незначительно, в среднем параметры соответствуют 0,9 ГПа.

4. Проведение многопроходной обработки инструментом с наконечником квадратного сечения и инструментом с винтовым наконечником не приводит к разупрочнению материала зоны перемешивания и зон термического и термомеханического влияния.

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

Студенту:

<b>Группа</b> 4БМ91	<b>ФИО</b> Судариков Александр Владимирович
------------------------	--

<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>Отделение материаловедения</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	22.04.01 Материаловедение и технологии материалов / Материаловедение

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	- При проведении исследования используется база ИФПМ СО РАН. - Участниками проекта являются 2 человека: студент-исполнитель и научный руководитель. - Приблизительная сумма затрат на выполнение проекта составляет 440 тысяч рублей.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	- Проект выполняется в соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» - Минимальный размер оплаты труда на 2021 год составляет 12 792 руб.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	- Согласно ст. 149 НК РФ данная НИР не подлежит налогообложению. - На основании ст. 58 закона №212-ФЗ ставка для расчета отчислений во внебюджетные фонды – 28,0%.

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

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	- Техничко-экономическое обоснование НИР - SWOT-анализ
2. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	- Планирование работ по проведению НИР - Расчет бюджета затрат на НИ
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	-Расчёт интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности

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

1. Матрица SWOT
2. График проведения и бюджет НИ

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	03.03.2021 г.
---	---------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Профессор ШБИП ТПУ ОСГН	Жиронкин Сергей Александрович	д.э.н., профессор		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4БМ91	Судариков А.В.		

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

Основная цель данного раздела – оценить перспективность развития и планировать финансовую и коммерческую ценность конечного продукта, представленного в рамках исследовательской работы. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на следующие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Целью магистерской диссертации является модификация структуры алюминиево-магниевого сплава АМг5 методом фрикционной перемешивающей обработки с различной конфигурацией инструмента.

#### **4.1 Технико-экономическое обоснование**

Алюминиевые конструкции широко распространены среди летательной техники вследствие своей высокой удельной прочности. Однако, алюминиевые сплавы обладают низким сопротивлением к износу, что приводит к разрушению трущихся сопряжений конструкций и последующему выходу их из строя.

Локальное модифицирование поверхности алюминия методом фрикционной перемешивающей обработки позволит повысить механические и триб-технические характеристики трущихся элементов конструкций без потери удельной прочности.

#### **4.2 Потенциальные потребители результатов исследования**

Проект выполнен в рамках научно-исследовательской работы для ИФПМ СО РАН. Проведенные в данной работе исследования представляют интерес для отраслей производства, применяющих металлоконструкции различных типов. К ним, в частности, относятся: авиа-, авто- и судостроение, ракетостроение, электротехническая промышленность, строительство.

#### **4.3 SWOT-анализ**

Анализ внутренней и внешней среды научно-исследовательского проекта осуществляется при помощи SWOT-анализа. SWOT-анализ позволяет оценить сильные и слабые стороны проекта, а также следующие из них возможности и угрозы внешней среды. Многие крупнейшие компании мира применяют SWOT-анализ для подробного исследования сегментов рынка. Результат анализа приведен в таблице 4.3.1.

Таблица 4.3.1 - SWOT-анализ проекта

Сильные стороны	Возможности во внешней среде
<p>C1. Наличие необходимого оборудования в лаборатории;</p> <p>C2. Малая потребность в расходных материалах;</p> <p>C3. Участники проекта обладают необходимой квалификацией для проведения всех запланированных исследований;</p> <p>C4. Изучаемый материал выпускается в промышленных масштабах.</p>	<p>V1. Возможность открытия фундаментального закона;</p> <p>V2. Простота перехода от фундаментальных исследований к практическому применению их результатов.</p>
Слабые стороны	Угрозы внешней среды
<p>Сл1. Значительная трудоемкость процесса подготовки образцов к исследованиям;</p> <p>Сл2. Высокая стоимость изучаемого материала;</p> <p>Сл3. Многофакторность изучаемых процессов.</p>	<p>У1. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования;</p> <p>У2. Отсутствие спроса на результаты исследования в случае обнаружения более стойкого и более дешёвого материала.</p>

Для определения стратегии работы по проекту, были определены взаимосвязи между внешней средой и сильными и слабыми сторонами проекта. Результаты данного анализа приведены в таблице 4.3.2.

Возможность V1 обусловлена подготовкой кадров лаборатории (C3), а также доступностью всего необходимого оборудования (C1). Возможность V2 следует из относительной доступности изучаемого материала (C4), благодаря чему появляется возможность наладить промышленную обработку алюминиевого профиля.

Таблица 4.3.2 – Сильные и слабые возможности проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	-	+	-
	B2	-	-	-	+
Слабые стороны проекта					
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	
	B1	+	-	+	
	B2	-	+	-	
Сильные стороны проекта					
Угрозы		C1	C2	C3	C4
	У1	+	+	+	-
	У2	-	-	-	+
Слабые стороны проекта					
Угрозы		Сл1	Сл2	Сл3	
	У1	+	+	-	
	У2	-	+	-	

Сл1 и Сл3 могут помешать реализации В1, так как нет возможности изучить большое количество образцов из-за высокой трудоемкости процесса их подготовки, а многофакторность изучаемого процесса фрикционного перемешивания может обусловить неправильность интерпретации результатов. Для того, чтобы проект был успешно реализован, необходимо определить оптимальное количество подготавливаемых образцов, а также по возможности, автоматизировать процесс их подготовки.

Высокая трудоемкость процесса (Сл1), а также высокая стоимость изучаемого материала (Сл2) приводят к возникновению угрозы У1, так как для реализации проекта необходимо оплатить труд работников, а также закупить расходные материалы. Во избежание возникновения подобной



ситуации, необходимо вовремя и заранее подготовить необходимую документацию и оговорить сроки с заказчиком работ. Высокая стоимость алюминиевых сплавов приводит к возникновению угрозы У2.

Угроза У1 за счёт всех имеющихся сильных сторон (С1-С4) может быть существенно снижена, так как не потребуются временные и финансовые затраты на закупку оборудования и поиск квалифицированных кадров. Угроза У2, на которую рассчитано наличие С4, на данном этапе является гипотетической, поэтому даже в случае, если будет открыт более устойчивый к триботехническим нагрузкам материал с близким показателем удельной прочности, потребуется время для налаживания процесса его промышленного производства.

Таким образом, значительных изменений в стратегию проведения исследований вносить не потребуется. Из рекомендаций можно вынести следующее: 1) эффективность исследований может быть повышена за счёт автоматизации процесса подготовки образцов, поэтому следует рассмотреть возможность приобретения необходимого оборудования; 2) для обеспечения своевременного финансирования, важно довести до сведения заказчика все сроки проведения работ.

#### **4.4 Планирование работ по НИР**

Для анализа трудоемкости выполнения НИР используется экспертная оценка. Трудоемкость, выражаемая в человеко-днях, носит вероятностный характер, так как находится в зависимости от большого числа переменных факторов. Этапы данной работы приведены в таблице 4.4.1.

Таблица 4.4.1 – Перечень этапов работ, распределение исполнителей

Основные этапы	№ ра	Содержание работ	Должность исполнителя
----------------	------	------------------	-----------------------

	б.		
Разработка задания на НИР	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления исследований в НИР	2	Изучение учебной литературы по теме	Инженер
	3	Изучение актуальных статей по теме	Инженер
	4	Выбор направления исследований	Научный руководитель
	5	Планирование эксперимента	Научный руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение теоретических расчетов	Научный руководитель, инженер
	7	Проведение эксперимента	Научный руководитель, инженер
	8	Обработка полученных экспериментальных результатов	Научный руководитель, инженер
	9	Сопоставление полученных результатов с теоретическими	Научный руководитель, инженер
Обобщение и оценка результатов	10	Оценка эффективности результатов	Научный руководитель, инженер
	11	Оценка целесообразности дальнейшего проведения ОКР	Научный руководитель, инженер
Оформление отчета по НИР	12	Составление пояснительной записки	Инженер

#### 4.4.1 Определение трудоемкости выполнения работ

При проведении научных исследований основную часть затрат составляют заработные платы (порядка 65%), поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления сметы.

Определение ожидаемой величины трудоёмкости проводится по формуле 1:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{\min\ i} + 2t_{\max\ i}}{5}, \quad (1)$$

где  $t_{ож\ i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, чел.-дн.;

$t_{\min\ i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.;

$t_{\max\ i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.

Зная величину ожидаемой трудоемкости, можно определить продолжительность каждой  $i$ -ой работы в рабочих днях  $T_{pi}$ , при этом учитывается параллельность выполнения работ разными исполнителями. Данный расчёт позволяет определить величину заработной платы (формула 2).

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i}, \quad (2)$$

где  $Ч_i$  - численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

#### 4.4.2 Построение графика работ

Для удобства построения графика полученную величину переводят в календарные дни по формуле 3:

$$T_{ki} = T_{pi} \times k_{\text{кал}}, \quad (3)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -ой работы в календарных днях (полученная величина округляется до целого числа;

$k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Определение величины  $k_{\text{кал}}$  проводится по формуле 4:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - (T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}})}, \quad (4)$$

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.

В 2019 году количество выходных и праздничных дней суммарно составит 118 дней.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,478 \approx 1,5 \quad (5)$$

Все полученные значения  $T_{ki}$  приведены в таблице 4.4.2.1.

На основе полученной таблицы строится диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными по времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ (таблица 4.4.2.2). Построение осуществляется за период времени дипломирования, с разбивкой по декадам и месяцам.

Таблица 4.4.2.1 – Анализ трудоемкости работ

№ раб.	Название работы	Трудоемкость работ			Исполнители	$T_{pi}$ , раб. дни	$T_{ki}$ , кал. дни
		$t_{\text{min } i}$ чел. - дни	$t_{\text{max } i}$ чел. - дни	$t_{\text{ож } i}$ чел.- дни			

1	Составление и утверждение технического задания	1	2	1	Научный руководитель, студент	1	2
2	Изучение учебной литературы по теме	5	10	12	Студент	7	11
3	Изучение актуальных статей по теме	10	15	12	Студент	12	18
4	Выбор направления исследований	1	2	1	Научный руководитель	1	2
5	Планирование эксперимента	2	4	3	Научный руководитель	3	5
6	Проведение теоретических расчетов	5	7	6	Научный руководитель, студент	3	5
7	Проведение эксперимента	30	36	32	Научный руководитель, студент	16	24
8	Обработка полученных экспериментальных результатов	14	20	16	Научный руководитель, студент	8	12
9	Сопоставление полученных результатов с теоретическими	3	5	4	Научный руководитель, студент	2	3
10	Оценка эффективности	5	7	6	Научный руководитель,	3	5

	результатов				студент		
11	Оценка целесообразности дальнейшего проведения ОКР	7	10	8	Научный руководитель, студент	4	6
12	Составление пояснительной записки	25	30	27	Студент	27	41

Таблица 4.4.2.2 – Календарный план-график проведения НИР

№	Название работы	Исполнители	$T_{ki}$ , календарных дней	Продолжительность выполнения работ																	
				янв.			фев.			март			апр.			май			июнь		
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2			
1	Составление и утверждение технического задания	Науч. рук., студент	2		1	2	3														
2	Изучение учебной литературы по теме	Студент	11		1	2	3														
3	Изучение актуальных статей по теме	Студент	18		1	2	3														
4	Выбор направления исследований	Науч. рук.	2					1	2	3											
5	Планирование эксперимента	Науч. рук.	5					1	2	3											
6	Проведение теоретических расчетов	Науч. рук., студент	5					1	2	3											
7	Проведение эксперимента	Науч. рук., студент	24								1	2	3		1	2					





- материальные затраты НИР;
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- накладные расходы научно-исследовательской работы (НИР).

#### 4.4.3.1 Расчет материальных затрат НИР

Представляют собой суммарную стоимость всех приобретенных материалов, комплектующих, сырья, канцелярских принадлежностей (если они не включены в расходы на использование оборудования или накладные расходы) и т.д., необходимых при проведении НИР. Стоимость возвратных отходов исключается из затрат на материальные ресурсы.

Величина материальных затрат  $Z_m$  определяется по формуле 6:

$$Z_m = (1 + k_T) \times \sum_{i=1}^m (C_i \times N_{расxi}), \quad (6)$$

где  $m$  - количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении НИР;

$N_{расxi}$  - количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении НИР (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  - цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  - коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен определяются поставщиками или предприятиями-изготовителями. Их значения можно найти, пользуясь ресурсами сети Интернет.

Коэффициент  $k_T$  определяется как отношение затрат по доставке материальных ресурсов к ценам на них. Его величина зависит от таких факторов как условия договоров поставки, вид материальных ресурсов, территориальная удаленность поставщиков и др. и составляет обычно 15-25%.

Рассчитанные материальные затраты на проведение данного исследования приведены в таблице 4.4.3.1.1.

Таблица 4.4.3.1.1 – Материальные затраты исследования

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	$Z_m$ , руб.
Лист 6мм АМг5	кг	18	425	7650
Фтороводородная кислота	кг	1	140	140
Соляная кислота	кг	1	99	99
Плавиновая кислота	кг	1	105	105
Азотная кислота	кг	1	120	120
Спирт	кг	1	100	100
Итого				8214

#### 4.4.3.2 Расчет затрат на экспериментальное оборудование для научных работ

Данная статья включает в себя расходы по приобретению необходимого оборудования: приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, испытательных машин и т.д., а также амортизационные расходы.

Необходимое для проведения исследования оборудование приведено в таблице 4.4.3.2.1. Цена указана по прейскурантам компаний-поставщиков.

Таблица 4.4.3.2.1 - Стоимость оборудования, необходимого для НИР

Оборудование	Единица	Количество	Цена за	Затраты,
--------------	---------	------------	---------	----------

	измерения		ед., руб.	руб.
Фрезерный станок	шт	1	300000	0
Лабораторная установка фрикционного перемешивания	шт	1	5000000	0
Универсальная испытательная машина LFM- 125	шт	1	1000000	0
Оптический микроскоп HST2000-W	шт	1	80000	0
Персональный компьютер	шт	1	26000	0
			Итого	0

Как видно из таблицы, итоговые затраты составили 0 руб., что связано с наличием всего необходимого оборудования на базе ИФПМ СО РАН.

Расчет амортизационных отчислений осуществляется исходя из базовой стоимости оборудования и утвержденных норм амортизации. Учёту амортизации подлежит оборудование сроком использования более года и стоимостью за единицу оборудования более 100 тыс. руб.

Расчёт амортизационных отчислений  $H$  осуществлялся по формуле 7:

$$H = \sum_{i=1}^n \frac{T_{ucni}}{365} \times K_i \times H_{ai}, \quad (7)$$

где  $n$ - число единиц оборудования стоимостью более 100 тыс. руб. и сроком службы более года;

$T_{ucni}$  – время использования  $i$ -ой единицы оборудования;

365 – количество дней в году;

$K_i$  – стоимость  $i$ -ой единицы оборудования;

$H_{ai}$  – норма амортизации  $i$ -ой единицы оборудования.

Норма амортизации является величиной, обратной сроку службы оборудования  $T_{cc}$ :

$$H_a = \frac{1}{T_{cc}} \quad (8)$$

Результаты расчета амортизации оборудования представлены в таблице 4.4.3.2.2.

Таблица 4.4.3.2.2 - Затраты на оборудование

Оборудование	Цена	Срок службы, лет	Срок использования в НТИ, кал. дни	$H$ , руб.
Универсальная испытательная машина LFM-125	10 000 000	30	10	13700
Лабораторная установка фрикционного перемешивания	50 000 000	более 20	10	68500
Фрезерный станок	300 000	более 20	14	575
Итого				82775

#### 4.4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Величина расходов по заработной плате рассчитывается по трудоёмкости выполняемых работ с учётом действующей систем окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20-30% от тарифа или оклада. Результаты расчета расходов приведены в таблице 4.4.3.3.1.

Основная заработная плата студента и руководителя от предприятия  $Z_{осн}$  вычисляется по формуле 9:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \times T_p, \quad (9)$$

где  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дней;

$Z_{дн}$  - среднедневная заработная плата работника, руб.

Значение величины  $Z_{дн}$  определяется как:

$$Z_{дн} = \frac{Z_M \times M}{F_{\partial}}, \quad (10)$$

где  $Z_M$  - месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

$F_{\partial}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней (таблица 4.4.3.3.1).

Таблица 4.4.3.3.1 – Годовой фонд рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	104	52
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	28	28
- невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	219	271

Расчет значения  $Z_M$  проводится по формуле:

$$Z_M = Z_{мс} \times (1 + k_{np} + k_{\partial}) \times k_p, \quad (11)$$

где  $Z_{мс}$  заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{np}=0,3$ – премиальный коэффициент;

$k_{\partial}=0,2$  – коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на промышленных предприятиях - за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия);

$k_p=1,3$ – районный коэффициент (для Томска).

Расчёт основной заработной платы показан в таблице 4.4.3.3.2.

Таблица 4.4.3.3.2 – Расчет заработной платы

Исполнитель	$Z_{mc}$	$k_{np}$	$k_d$	$k_p$	$Z_M$	$Z_{дн}$	$T_p$	$Z_{осн}$
Руководитель	30765	0,3	0,2	1,3	59992	3013	41	123533
Студент	13190				25720	1044	82	85608
Итого:								209141

#### 4.4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.). Определение величины дополнительной заработной платы  $Z_{дон}$  ведется по формуле 12:

$$Z_{дон} = Z_{осн} \times k_{дон}, \quad (12)$$

где  $k_{дон}=0,12$  – коэффициент дополнительной заработной платы.

Результаты вычислений  $Z_{дон}$  приведены в таблице 4.4.3.4.1.

Таблица 4.4.3.4.1 – Дополнительная заработная плата

Исполнитель	$Z_{дон}$
Руководитель	14824
Студент	10273
Итого:	25097

#### 4.4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Данная статья расходов содержит обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Размер выплат находится по формуле 13:

$$Z_{внеб} = (Z_{осн} + Z_{доп}) \times k_{внеб}, \quad (13)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений во внебюджетные фонды

Согласно ст.58 Федерального закона №212-ФЗ, для организаций, основным видом экономической деятельности которых являются научные исследования и образование, отчисления в страховые фонды составляют 28%, откуда  $k_{внеб}=0,28$ . Затраты на отчисления приведены в таблице 4.4.3.5.1.

Таблица 4.4.3.5.1 – Затраты на отчисления

Исполнитель	$Z_{внеб}$
Руководитель	38741
Студент	26846
Итого:	65587

#### 4.4.3.6 Накладные расходы

В данной статье учитываются все прочие расходы, не включенные в предыдущие статьи, такие как электроэнергия, печать документов, оплата услуг связи и т.д. Их величина определяется как:

$$Z_{накл} = (Z_m + Z_{осн} + Z_{доп} + Z_{внеб}) \times k_{пр}, \quad (14)$$

где  $k_{пр}=0,16$ - коэффициент, учитывающий накладные расходы в данной работе.

$$Z_{накл} = (11824 + 209141 + 25097 + 65587) \times 0,16 = 49864 \quad (15)$$

#### **4.4.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта**

Определение бюджета затрат на НИР приведет в таблице 4.4.3.7.1.

Таблица 4.4.3.7.1 – Бюджет НИР

№	Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1	Материальные затраты НИР	8214	п. 4.4.3.1
2	Затраты на оборудование	82775	п. 4.4.3.2
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей проекта	209141	п. 4.4.3.3
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей проекта	25097	п. 4.4.3.4
5	Отчисления во внебюджетные фонды	65587	п. 4.4.3.5
6	Накладные расходы	49864	п. 4.4.3.6
Итого:		440678	-

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основной для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Таким образом, расчетные затраты не превышают запланированную сумму в 750 тыс. руб. Согласно таблице 4.4.3.7.1, наибольшие затраты по проведению НИР формируются за счёт затрат на заработную плату, а также на амортизационные расходы по дорогостоящему оборудованию.

#### **4.5 Определение финансовой эффективности и ресурсоэффективности**



Определение эффективности НИР производится посредством расчёта интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

#### 4.5.1 Определение финансовой эффективности

Интегральный показатель финансовой эффективности НИР получают в ходе оценки бюджета затрат трех или более вариантов исполнения научного исследования. Так как данный метод обработки материала является уникальным, определение финансовой эффективности данного НИР не предоставляется возможным.

#### 4.5.2 Определение ресурсоэффективности

Ресурсоэффективность проекта можно оценить с помощью интегрального показателя ресурсоэффективности, вычисляемого по формуле 15:

$$I_p^{ucni} = \sum_{i=1}^n (a_i \times b_i) \quad (15)$$

где  $I_p^{ucni}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  – весовой коэффициент разработки;

$b_i$  – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

В таблице 4.5.2.1 приведен расчет интегрального показателя ресурсоэффективности.

Таблица 4.5.2.1 – Сравнительная характеристика вариантов исполнения НИР

Критерии	Весовой коэффициент	1) электролитическое наводороживание
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,15	5
2. Удобство в эксплуатации	0,15	4
3. Энергосбережение	0,20	4
4. Надёжность	0,35	5
5. Материалоёмкость	0,20	4
$I_{pi}$	1	4,4

Стоит отметить, что высокие баллы критериев позволяют судить о том, что метод надёжный и соответствует требованиям потребителей, поскольку позволяет повысить технологичность производства и эксплуатационные качества продукта.

#### 4.6 Заключение по разделу

Для оценки эффективности стратегии проведения НИР проведён SWOT-анализ. По результатам анализа рекомендуется автоматизировать процесс подготовки образцов с целью снижения трудоёмкости исследования.

Составлен план проведения НИР. Весь исследовательский процесс может быть разделён на 12 этапов. На выполнение поставленных задач заданным коллективом требуется порядка пяти месяцев. Для иллюстрации календарного плана составлена диаграмма Ганта.

Рассчитанные затраты на проведение НИР не превышают заложенного бюджета, который составляет порядка 440 тыс. рублей. Основными являются расходы на оборудование (амортизационные расходы) и расходы на заработную плату исполнителей.

Произведен расчёт финансовой ресурсоэффективности применяемого метода обработки материала. По итогам данного расчёта можно сделать вывод о высоко технологичности метода обработки.

## **Список публикаций**

1. Доклад, представленный на XVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 27-30 Апреля 2021 года).