

Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки 12.04.02 «Оптотехника»  
 Отделение материаловедения

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Физические процессы, сопутствующие глубокой лазерной гравировке металлов</b>
УДК 739.7:621.373.826:53.07

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ01	Степина Анастасия Игоревна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Зыков И.Ю.	к.ф.-м.н.		

Рецензент

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Институт сильноточной электроники СО РАН	Лосев В.Ф.	д.ф.-м.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Гасанов Магеррам Али оглы	д-р экон. наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Полисадова Е.Ф.	д.ф.-м.н.		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код	Результат освоения ООП
<b>Универсальные компетенции</b>	
<b>УК(У)-1</b>	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий
<b>УК(У)-2</b>	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
<b>УК(У)-3</b>	Способен организовывать и руководить работой команды, выработывая командную стратегию для достижения поставленной цели
<b>УК(У)-4</b>	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), 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 определить и реализовать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
<b>ОПК(У)-1</b>	Способен представлять современную картину мира научную картину мира, выявлять естественнонаучную сущность проблемы, формулировать задачи, определять пути их решения и оценивать эффективность выбора и методов правовой защиты результатов интеллектуальной деятельности с учетом специфики исследований для разработки оптической техники, оптических материалов и технологий оптического производства
<b>ОПК(У)-2</b>	Способен организовать проведение научного исследования и разработку, представлять и аргументированно защищать полученные результаты интеллектуальной деятельности, связанные с научными исследованиями в области оптической техники, оптико-электронных приборов и систем
<b>ОПК(У)-3</b>	Способен приобретать и использовать новые знания в своей предметной области на основе информационных систем и технологий, предлагать новые идеи и подходы к решению инженерных задач
<b>Профессиональные компетенции</b>	
<b>ПК(У)-1</b>	Способность к анализу состояния научно-технической проблемы, формированию технического задания и постановке цели и задач в сфере проектирования оптических и оптико-электронных приборов, систем и комплексов, в области исследования оптических материалов и технологий на основе подбора и изучения литературных и патентных источников
<b>ПК(У)-2</b>	Способность к моделированию работы оптико-электронных приборов и светотехнических устройств на основе физических процессов и явлений, выбору численного метода их моделирования, разработке нового или выбор готового алгоритма решения задачи
<b>ПК(У)-3</b>	Способность к выбору оптимального метода и разработке программ экспериментальных исследований, проведению оптических, фотометрических и электрических измерений с выбором технических средств и обработкой экспериментальных данных

<b>ПК(У)-4</b>	Способность к разработке и внедрению фотонных и оптических технологий, к разработке методов контроля качества материалов и изделий, составлению программ испытаний современных светотехнических и оптических приборов и устройств, фотонных материалов.
<b>ПК(У)-5</b>	Способность конструировать и проектировать отдельные узлы и блоки для осветительной, облучательной, оптико-электронной, лазерной техники, оптоволоконных, оптических, оптико-электронных, лазерных систем и комплексов, осветительных и облучательных установок различного назначения.
<b>ПК(У)-6</b>	Способность применять современную элементную базу электротехники, электроники и микропроцессорной техники при разработке и проектировании оптических и светотехнических систем, приборов деталей и узлов оптотехники;
<b>ПК(У)-7</b>	Способность проводить научные исследования и опытно-конструкторские работы в области оптического приборостроения, оптических материалов и технологий
<b>Профессиональные компетенции университета</b>	
<b>ДПК (У)-1</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 ИШНПТ  
 Направление подготовки (специальность) 12.04.02 Оптотехника  
 Отделение школы (НОЦ) отделение материаловедения (ОМ)

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

<b>магистерской диссертации</b> <small>(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)</small>
--

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ01	Степина Анастасия Игоревна

Тема работы:

Физические процессы, сопутствующие глубокой лазерной гравировке металлов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><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>Исследование связи параметров глубокой лазерной гравировки с режимом лазерного воздействия, параметрами обрабатываемого материала и газовой атмосферы, в которой происходит обработка, а также теплопроводности металла. Попытаться связать влияние данных факторов с физическими процессами, сопутствующими лазерной гравировке.</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>Влияние различных факторов на скорость лазерной гравировки, в том числе:          - давление газовой атмосферы;          - теплопроводность металла.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>-Схема установки.          -Параметры лазерного излучения          -Полученные зависимости скорости и глубины обработки от давления воздуха и теплопроводности материала.</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>  <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Профессор ОСГН Гасанов Магеррам Али оглы</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Доцент Антоневиц Ольга Алексеевна</p>
<p>Английский язык</p>	<p>Профессор ОИЯ Матвеевко И.А.</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>Объекты и методы экспериментального исследования.</p>	
<p>Экспериментальное исследование взаимодействия лазерного излучения с металлами при глубокой лазерной гравировке.</p>	
<p>Заключение</p>	

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

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Зыков Илья Юрьевич	к.т.н, доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ01	Степина Анастасия Игоревна		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4ВМ01	Степиной Анастасии Игоревне

<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение</b>	<b>Отделение материаловедения</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	12.04.02 Опотехника

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; анкетирование; опрос.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

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

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта
2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение заинтересованных сторон и их ожиданий.
3. Планирование процесса управления НИТ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИТ
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Проведение оценки экономической эффективности изучения физических процессов, сопутствующих глубокой лазерной гравировке металлов

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

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НИТ
4. Расчёт денежного потока
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИТ

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Профессор ОСГН	Гасанов Магеррам Али оглы	д-р экон. наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4ВМ01	Степина Анастасия Игоревна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>		<b>ФИО</b>	
4ВМ01		Степина Анастасия Игоревна	
<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа новых производственных технологий</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>Отделение материаловедения</b>
<b>Уровень образования</b>	магистратура	<b>Направление/специальность</b>	12.04.02 Оптотехника

Тема ВКР:

<b>Физические процессы, сопутствующие глубокой лазерной гравировке металлов</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p><b>Введение</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.</li> <li>– Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации</li> </ul>	<p><i>Объект исследования:</i> процесс взаимодействия лазерного излучения с металлическими материалами</p> <p><i>Область применения:</i> лазерная обработка металлических материалов</p> <p><i>Рабочая зона:</i> лаборатория</p> <p><i>Размеры помещения:</i> 6,5х6,5 м<sup>2</sup></p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> ноутбук, механический индикатор перемещений, лазерный станок Минимаркер 2, форвакуумный насос, вакуумная камера, ручной насос</p> <p><i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> на ноутбуке осуществляется задание параметров лазерной установки и наносимого рисунка, форвакуумный насос откачивает воздух из камеры, ручной насос создает избыточное давление, в камере через окошки контролируется процесс лазерной гравировки, с помощью индикатора измеряется глубина создаваемого рисунка</p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при лазерной обработке металлических материалов:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p>ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования;</p> <p>ГОСТ EN 894-1-2012. Безопасность машин. Эргономические требования к оформлению индикаторов и органов управления. Часть 1. Общие руководящие принципы при взаимодействии оператора с индикаторами и органами управления;</p> <p>ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования;</p> <p>ГОСТ 31581-2012 Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий.</p> <p>Об утверждении перечня сведений конфиденциального характера: указ Президента РФ от 6.03.1997 г. за № 188 (в редакции указов Президента Российской Федерации от 23.09.2005 г. N 1111; от 13.07.2015 г. N 357);</p> <p>Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 16.12.2019) // Собрание законодательства Российской Федерации №1 от 7 января 2002 года, ст. 3</p>
<p><b>2. Производственная безопасность при лазерной обработке металлических материалов:</b></p>	<p><b>Вредные факторы:</b></p> <p>1. производственные факторы, связанные с чрезмерным загрязнением воздушной среды в зоне дыхания, то есть с аномальным физическим состоянием</p>

<ul style="list-style-type: none"> <li>– Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов</li> <li>– Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора</li> </ul>	<p>воздуха (в том числе пониженной или повышенной ионизацией) и (или) аэрозольным составом воздуха;</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2. инфракрасное, ультрафиолетовое и видимое излучение от источников накачки, плазменного факела и материалов мишени;</li> <li>3. лазерное излучение;</li> <li>4. недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>5. отклонение показателей микроклимата в помещении.</li> </ol> <p><b>Опасные факторы:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов.</li> </ol> <p><b>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных фактор:</b> специальная одежда, маски или щитки, вытяжная вентиляция, защита органов дыхания и изоляция процесса, защитные очки</p> <p><b>Расчет:</b> расчет системы искусственного освещения.</p>
<p><b>3. Экологическая безопасность при лазерной обработке металлических материалов</b></p>	<p><b>Воздействие на селитебную зону:</b> при взрыве могут пострадать соседние сооружения. Имеющийся уровень лазерного, инфракрасного и ультрафиолетового излучения на селитебную зону влияния не оказывают.</p> <p><b>Воздействие на литосферу:</b> твердые отходы в виде частиц удаляемого материала.</p> <p><b>Воздействие на гидросферу:</b> не оказывает влияния, водные ресурсы не используются ни для охлаждения установки и оборудования, ни для утилизации отходов.</p> <p><b>Воздействие на атмосферу:</b> выделение вредных аэрозолей, газов и паров при лазерном воздействии на материал.</p>
<p><b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при лазерной обработке металлических материалов</b></p>	<p><b>Возможные ЧС:</b> пожар, взрыв, разрушение здания</p> <p><b>Наиболее типичная ЧС:</b> пожар.</p>
<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</p>	

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ01	Степина Анастасия Игоревна		

## **Реферат**

Выпускная квалификационная работа состоит из 142 с., 33 рис., 47 табл. и 46 источника.

Ключевые слова: глубокая лазерная гравировка, алюминий, латунь, сталь 40Х, свинец, оловянно-свинцовый припой ПОС60, скорость обработки, давление, факел, заглубляющийся источник тепла, вакуумная камера.

Объектом исследования является процесс взаимодействия лазерного излучения с металлическими материалами.

Цель работы – изучение физических процессов, сопутствующих глубокой лазерной гравировке металлов, установление закономерностей и зависимостей скоростей обработки различных металлов от внешних условий (повышенное и пониженное давление).

В процессе исследования проводились сбор, обработка и систематизация литературных данных основных принципов, закономерностей и характеристик лазерной обработки металлов, в том числе и гравировки, проведен экономический анализ работы и определены мероприятия по технике безопасности.

Новизна исследования заключается в том, что в дипломной работе достаточно подробно проанализирована зависимость высоты заглубления (скорости обработки) металлических материалов от уровня давления окружающей среды, что позволяет разобраться в сущности и физических процессах при лазерной обработке и ее особенностях в отношении данных типов металлов.

Область применения: лазерная обработка металлических материалов.

Экономическая значимость работы обусловлена изучением зависимости скорости обработки металлов при глубокой лазерной гравировке, что позволит оптимизировать данный процесс и сделать его более энергоэффективным, так как снижение энергоемкости является одной из ключевых задач развития экономики России.

## Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

НИР – научно-исследовательская работа;

ПДК – предельно-допустимая концентрация;

ВКР – выпускная квалификационная работа;

ЛО – лазерная обработка;

ПНУ – плоскость наилучшей установки;

а.т.и. – атмосфера избыточная;

ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) – адаптивная сеть на основе системы нечеткого вывода.

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

**каустика:** Огибающая семейства лучей, т.е. геометрическое место точек пересечения бесконечно близких лучей семейства.

**абляция:** Фазовый переход из твердого состояния в пар.

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 3882 – 74 Сплавы твердые спеченные. Марки.

## Оглавление

Введение.....	12
1 Литературный обзор .....	15
1.1 Лазерный нагрев материала .....	17
1.2 Лазерная маркировка и гравировка.....	19
1.2.1 Глубокая лазерная гравировка.....	24
1.3 Влияние газа на процесс лазерной обработки.....	27
2 Объекты и методы экспериментального исследования .....	36
2.1 Исследуемые образцы Al, латунь, сталь 40Х, свинец, оловянно-свинцовый припой ПОС60 .....	36
2.2 Лазерная система.....	39
2.3 Вакуумная камера .....	41
2.4 Методы экспериментального исследования .....	44
3 Экспериментальное исследование взаимодействия лазерного излучения с металлами при глубокой лазерной гравировке.....	48
3.1 Глубокая лазерная гравировка при различных давлениях .....	48
3.2 Улавливание разлетающегося из зоны лазерного воздействия факела .....	56
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	59
5 Социальная ответственность.....	97
Заключение .....	113
Список использованных источников .....	114
Приложение А .....	119

## **Введение**

В современном мире лазерные технологии нашли применение во многих областях деятельности человека, а именно в: медицине (офтальмология, онкология, пластическая и общая хирургия, косметология, лазерная стоматология) науке (спектроскопия, измерение расстояний, лазерное охлаждение), промышленности (поверхностная лазерная обработка, лазерная сварка, маркировка и гравировка), вооружение (лазерное оружие, лазерное наведение), информационных технологиях (оптическая связь (волокно), голография, считывание штрих-кодов), а также в культуре и сфере развлечений (ЭМИ (электронный музыкальный инструмент) «лазерная арфа», лазерные шоу). Также в повседневной жизни применяются лазерные принтеры, мыши и указки. Все вышеперечисленное является далеко не всеми сферами, в которых нашли применение лазерные технологии. Они развиваются со стремительной скоростью и внедряются во все большие сферы деятельности людей ввиду своей функциональности, высокого качества исполнения поставленных задач, быстрого действия и ряда других достоинств. Поэтому лазерные технологии на сегодняшний день являются одними из наиболее конкурентоспособных.

Актуальность дипломной работы. Обработка материалов является одной из сфер деятельности людей, в которой в полной мере задействованы лазерные технологии. С развитием науки и техники возникает все больший спрос на высококачественные материалы. Соответственно, объемы выпуска данных материалов не должны снижаться, а наоборот расти, желательно со снижением количества брака. На этапе обработки материалов крайне важна точность выполнения работ, так как от этого зависят дальнейшие функциональные возможности деталей на других этапах производства и в жизни в целом. Механическая обработка уступает лазерной по всем перечисленным параметрам. Но несмотря на имеющиеся достоинства, лазерная обработка имеет свои особенности и недостатки. Поэтому требуются более детальное изучение

данного процесса для изучения этих особенностей, закономерностей и нахождения путей для по устранению или минимизации недостатков.

Целью данной выпускной квалификационной работы является изучение режимов глубокой лазерной гравировки металлических материалов, установление закономерностей и зависимостей скоростей обработки различных металлов от внешних условий (повышенное и пониженное давление).

Для достижения этих целей в дипломной работе поставлены следующие задачи:

- провести литературный обзор по изучаемому направлению;
- изучить теоретические основы глубокой лазерной гравировки и принцип действия волоконного лазера на примере лазерного маркера МиниМакркер 2;
- разработать и собрать экспериментальную установку;
- провести ряд экспериментов с целью определения скорости обработки некоторых металлов;
- проанализировать зависимость скорости обработки при лазерной гравировке металлических материалов от давления;
- визуально оценить изменение формы пароплазменного факела от давления;
- сформулировать основные выводы по работе.

Объектом исследования в данной ВКР является процесс взаимодействия лазерного излучения с металлическими материалами.

Предметом исследования выступила скорости обработки металлических материалов.

Новизна исследования заключается в том, что в дипломной работе прямо указано на существование зависимости скорости обработки металлических материалов от статического давления воздуха. Обзор литературных источников позволяет предположить, что это сделано впервые. Проанализирована зависимость высоты заглубления (скорости обработки) металлических материалов при изменении давления воздуха от 10 mbar до 2 bar, что позволяет

разобраться в сущности и физических процессах при лазерной обработке и ее особенностях в отношении данных типов металлов.

Практическая значимость результатов, приведенных в данной ВКР, заключается в том, что они могут быть востребованы в области лазерной обработки металлических материалов или в дальнейших научных исследованиях. Полученные результаты помогут сделать обработку металлов более эффективной ввиду подбора оптимальных параметров внешней среды для каждого из типов металлов, а также смогут служить основой для дальнейших исследований других типов материалов в этой сфере.

## 1 Литературный обзор

В рамках литературного обзора рассмотрены имеющиеся исследования по лазерной гравировке металлов и основные закономерности данного метода. Представлены результаты современных научных исследований в области лазерной обработки (ЛО) металлических материалов с применением различных газов и влиянии их параметров на данные процессы.

При лазерной обработке происходит взаимодействие лазерного излучения с материалом. В результате образуются детали различных форм, размеров и свойств. В зависимости от желаемого результата заготовку могут нагревать, плавить и испарять. При плавлении расплав удаляется из зоны воздействия лазерного луча давлением отдачи, вызванным испарением материала, или струей вспомогательного газа (рис.1.1). Процессы выталкивания расплава и поверхностного испарения для удаления материала схематически показаны на рисунке 1.2 (laser beam - лазерный луч, melt – расплавленный материал, solid – твердый материал, recoil pressure – давление отдачи, vapor – испаренный материал, melt expulsion – вытеснение расплава). В типичных условиях обработки материалов (сверление, резка, сварка и т.д.) давление отдачи превышает максимально возможное значение давления поверхностного натяжения. Вытеснение расплава является доминирующим механизмом удаления материала при низких мощностях; тогда как поверхностное испарение становится доминирующим при высоких мощностях. Кроме того, скорость удаления материала при выталкивании расплава увеличивается с увеличением мощности лазера, достигает максимума, а затем уменьшается; в то время как скорость удаления материала поверхностным испарением постоянно увеличивается с мощностью лазера. В нестационарных условиях прямой эффект давления отдачи заключается в уменьшении толщины расплавленного слоя путем вытеснения расплава. При более высокой поглощенной мощности лазера давление отдачи становится высоким, что приводит к уменьшению толщины слоя жидкости (из-за усиленного вытеснения расплава) [1] [10].

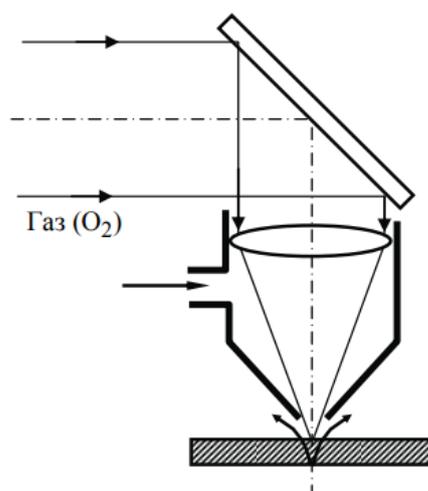


Рисунок 1.1 – Оптическая схема резака для газолазерной резки [2]

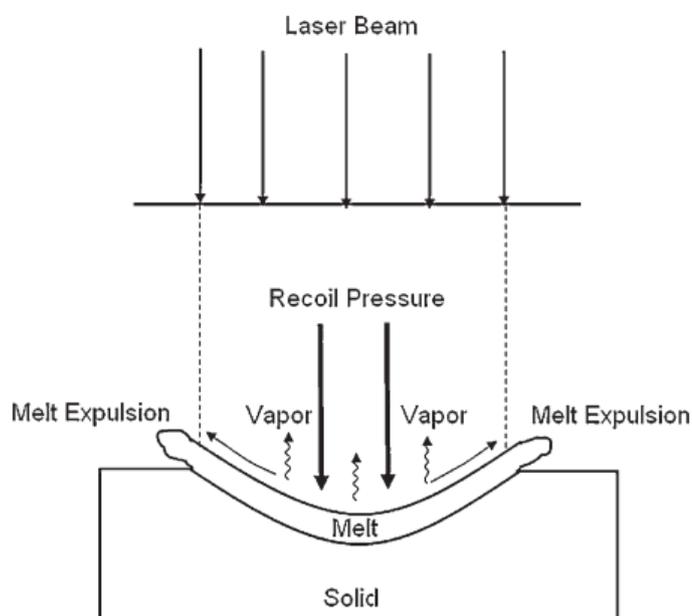


Рисунок 1.2 – Схема процессов поверхностного испарения и выталкивания расплава при удалении материала при взаимодействии лазерного излучения с материалом [1]

В основе любой лазерной технологии при обработке металлов лежит поглощение лазерного излучения и сопутствующий нагрев металла. Этот нагрев может сопровождаться плавлением, кипением, испарением или абляцией. Поэтому прежде чем перейти к методам лазерной обработки, рассмотрим лазерный нагрев материалов [10].

## 1.1 Лазерный нагрев материала

При нагреве материала лазерным излучением происходит поглощение светового потока и передача его энергии тепловым колебанием решетки твердого тела [3]. После стадии разогрева материала следует его плавление, испарение и остывание с одновременно происходящими фазовыми превращениями, диффузионными и химическими процессами [3] [10].

Количество поглощенной энергии зависит от оптических и теплофизических свойств материалов, особенно для металлов, и с увеличением длины волны излучения уменьшается. Поглощение оптического излучения ( $\lambda = 0,1 - 1000$  мкм) металлами происходит в слое толщиной  $\delta = 10^{-6} - 10^{-5}$  см, соответствующей глубине проникновения излучения в металл [4]. Порядка 70 - 95 % лазерного излучения в оптическом диапазоне длин волн отражается большинством металлов. Отражательная способность материалов достигает максимальных значений при наличии у них полированных поверхностей (рис.1.3: HPDL – диодный лазер высокой мощности; carbon steel – углеродистая сталь). К примеру, полированный алюминий при комнатной температуре отражает 97 % падающего потока излучения с длиной волны 10,6 мкм (CO<sub>2</sub>-лазер), а полированная медь - 99 % [3]. Коэффициент отражения определяет интенсивность отраженного лазерного излучения при его воздействии на твердое тело. Так И. Спелдинг установил, что при нормальном падении луча и комнатной температуре максимальный коэффициент отражения будет при воздействии на металл излучения CO<sub>2</sub>-лазера. Однако с повышением температуры обрабатываемой поверхности будет происходить увеличение поглощательной способности [5]. На рисунке 1.4 показано изменение отражательной способности в процентах (по вертикали) при изменении температуры в кельвинах (по горизонтали) для 3 металлов (steel – сталь) [10].

Плотность излучения и время его воздействия имеют определенные диапазоны значений для различных методов лазерной обработки, таких как нагрев, плавление и ударное нагружение. При времени воздействия на материал

$10^{-3}$  -  $10^{-2}$  с и плотности энергии излучения  $10^3$  -  $10^4$  Вт/см<sup>2</sup> будет наблюдаться лазерный нагрев, в результате которого в поверхностном слое будут происходить фазовые превращения. Ударное воздействие происходит при максимальной плотности энергии излучения, порядка  $10^8$  -  $10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>, и времени воздействия  $10^{-9}$  -  $10^{-6}$  с [7] [10].

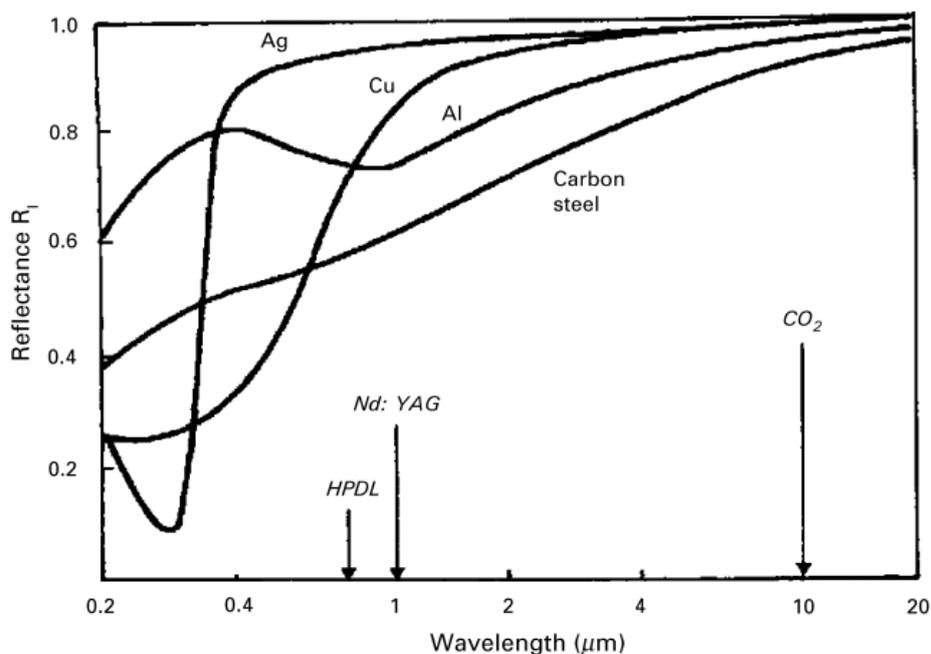


Рисунок 1.3 – Спектр отражения различных полированных металлических поверхностей: по горизонтали отложены значения длин волн (микрометры) для различных типов лазеров, по вертикали – коэффициент отражения [6]

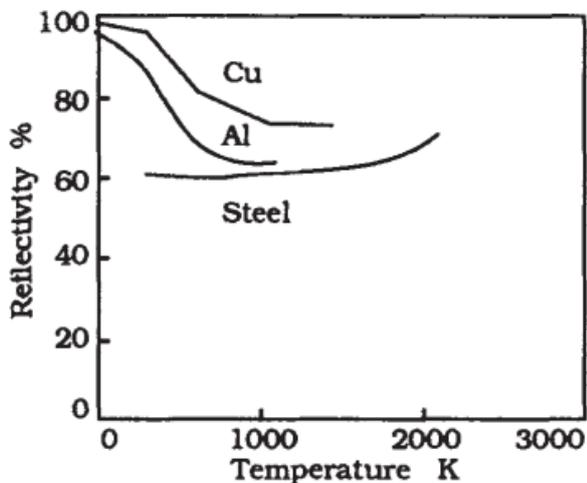


Рисунок 1.4 – Изменение отражательной способности с температурой для излучения 1,06 мкм [1]

CO<sub>2</sub> –, Nd:YAG – лазеры и различные твердотельные лазеры используются в непрерывном или импульсном режиме при обработке различных материалов [7]. С этой же целью в последнее время применяются волоконные лазеры. Лазерную обработку проводят на воздухе, в среде аргона, азота и их смесях [7] [10].

## **1.2 Лазерная маркировка и гравировка**

Маркировка – это процесс нанесения определенной информации на детали и изделия с целью их дальнейшего распознавания. Гравировка предназначена для получения надписей, рисунков, а также схематических художественных изображений с целью увеличения срока их использования [5] [10].

Лазерная маркировка имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами нанесения информации на изделие (механический, электрохимический, с использованием красок и т.д.):

- миниатюрность наносимого знака (ширина линии знака может быть порядка 10 мкм);
- отсутствие механического воздействия на изделие. Это позволяет обрабатывать тонкостенные и хрупкие детали, а также изделия в сборе;
- высокое качество нанесения знаков;
- высокая производительность;
- возможность полной автоматизации процесса [5] [10].

Глубина маркировки металлов при обычных режимах составляет примерно 10 мкм. Ее можно увеличивать или уменьшать, варьируя параметры мощности лазера, частоты следования импульсов и скорости перемещения лазерного луча относительно маркируемой поверхности [5] [10].

При выполнении гравировки на значительную глубину (к примеру, 200 мкм) применяются многопроходные режимы маркировки при средних технологических режимах. При этом за каждый проход испаряется около 10 мкм

металла. Таким способом можно, например, делать гравировку надписей на поверхности, печати, таблички и т.д. [5]. В зависимости от типа обрабатываемого материала могут применяться Nd:YAG- , CO<sub>2</sub> – и волоконные лазеры. Однако маломощные CO<sub>2</sub> - лазеры очень сильно отражаются от металлов и при использовании данного типа лазеров в целях гравировки металлических материалов, на заготовку наносят специальные поглощающие смеси [10].

Лазерная гравировка – это термомеханический процесс, в котором энергия лазерного луча используется для создания изображений путем формирования оксидных пленок на поверхности металлов, удаления окисленного слоя, создание рельефа на поверхности (микрореуплав), удаления материала заготовки и т.п. При этом процесс является поверхностным и происходит при воздействии коротких импульсов. КВАНТ-60 является классической установкой для маркировки и гравировки короткими импульсами. Данный метод особенно подходит для обработки твердых материалов, которые трудно обрабатывать обычными способами. Высокая лазерная плотность мощности высвобождается за короткий промежуток времени (длительность импульса) на целевое пятно диаметром несколько микрометров и может надежно создавать изображения с высоким разрешением на различном металле (например, меди и нержавеющей стали). Способы воздействия лазерного луча на поверхность материала зависят от параметров процесса и используемого материала. При использовании металла часть энергии лазерного луча отражается, а остальная энергия преобразуется в тепло (рис.1.5(a); liquid interface – жидкая поверхность раздела, vaporized material – испаренный материал). Количество тепла увеличивается с длительностью импульса лазерного луча. Температура поверхности быстро увеличивается, возможно, вплоть до точки плавления (рис.1.5(b)) или даже до точки кипения, когда материал удаляется из целевой области в виде пара (рис.1.5(c)). При достаточно высокой энергии возникает высокое давление и появляется плазма (рис.1.5(d)). Плазма приводит к дополнительной нелинейности в процессе лазерной абляции [8] [10].

В процессе лазерной гравировки сфокусированный лазерный луч сканирует заготовку, нанося изображение. В ходе поглощения энергии каждого лазерного импульса, происходит переход материала в жидкое или газообразное состояние. Когда испаренный материал выталкивается, происходит удаление материала, которое в итоге образует толщину одного удаленного слоя. Путем удаления нескольких слоев материала с различным рисунком сканирования для каждого, можно получить трехмерную структуру поверхности [9] [10].

На рисунке 1.6 представлена схематическая иллюстрация процесса лазерной гравировки (laser spot – лазерное пятно). Пятно лазерного луча сканирует поверхность материала заготовки определенным, заранее определенным способом (стратегия сканирования), и импульсы лазерного луча генерируются периодически, вызывая абляцию и удаление целевого материала [9] [10].

На удаление материала влияют характеристики лазерного луча, свойства заготовки и способ их взаимодействия. Свойства заготовки зависят от материала и геометрии, наиболее важными из которых являются плотность, температуры испарения при плавлении, удельная теплоемкость, теплопроводность, скрытая теплота плавления-испарения и поглощательная-отражательная способность в твердом и жидком состояниях. Лазерный луч может характеризоваться параметрами лазерного станка, такими как тип лазера, длина волны, диаметр лазерного пятна, длительность импульса, и параметрами процесса, такими как средняя выходная мощность, частота повторения импульсов и скорость сканирования [9] [10].

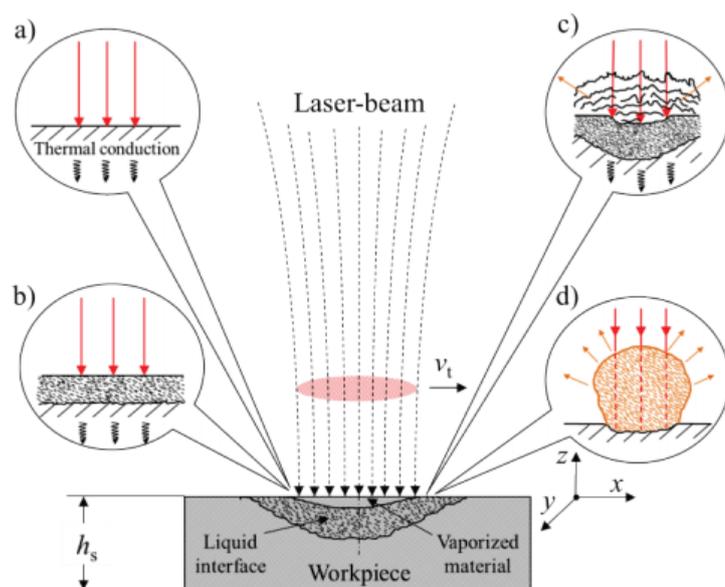


Рисунок 1.5 – Схема облученного лазером материала: нагревание (thermal conduction – теплопроводность) (a), плавление (b), испарение и плавление (c) и образование плазмы (d) [8]

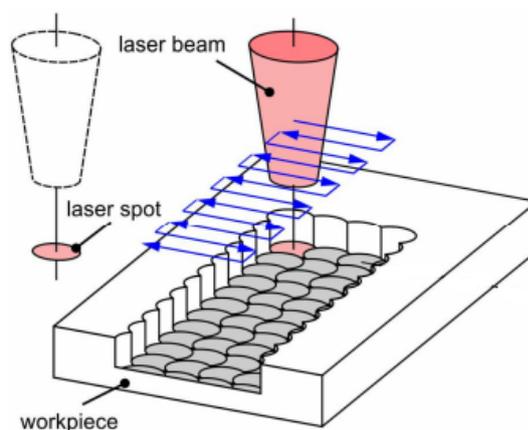
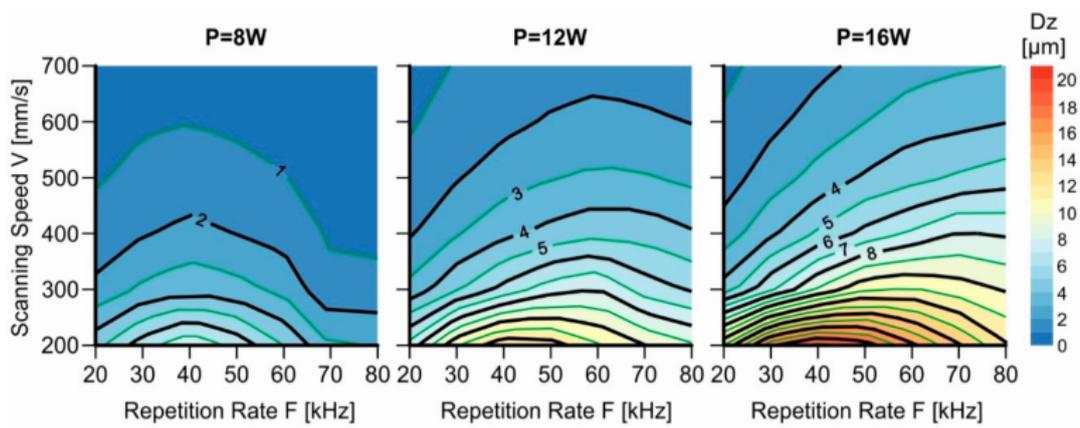


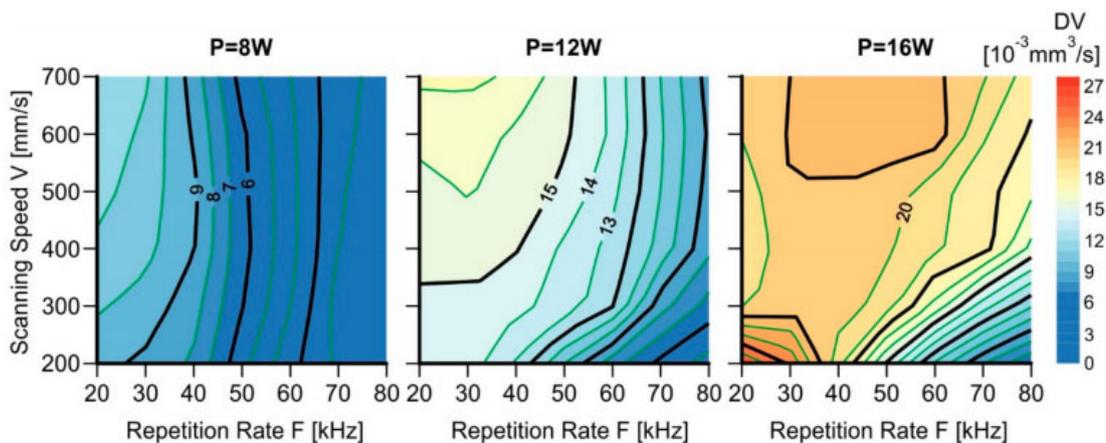
Рисунок 1.6 – Схематическое изображение процесса лазерной гравировки [9]

Исследование, проведенное в работе [16], связано с влиянием мощности лазера, частоты следования импульсов и скорости сканирования на скорость удаления материала и толщину удаленного слоя при лазерной гравировке пластины из нержавеющей стали SAE 304 толщиной 5 мм с помощью наносекундной лазерной установки Nd: YAG DMG MORI Lasertec 40. На рисунке 1.7 по горизонтали отложены значения частоты следования импульсов (килоггерцы), по вертикали – скорость сканирования (миллиметры в секунду). Справа представлена цветовая шкала толщины удаленного слоя (рис.1.7(a)) и

скорости удаления материала (рис.1.7(b)). Данные приведены при трех значениях мощности лазера : 8, 12 и 16 Вт. Максимальная толщина  $Dz$  слоя удаляемого материала составила 19,4 мкм параметров процесса: средняя мощность  $P = 16$  Вт, частота следования  $F = 40$  кГц и скорость сканирования  $V = 200$  мм/с. Максимальная скорость удаления материала  $DV$  составляет 0,0261 мм<sup>3</sup>/с при параметрах процесса: средняя мощность  $P = 16$  Вт, частота следования  $F = 20$  кГц и скорость сканирования  $V = 200$  мм/с. Авторы [16] пришли к выводу, что, как правило, увеличение средней выходной мощности и уменьшение скорости сканирования приводит к увеличению толщины  $Dz$  слоя удаляемого материала. Кроме того, увеличение средней выходной мощности и скорости сканирования и уменьшение частоты следования импульсов приводит к увеличению скорости  $DV$  удаления материала.



(a)



(b)

Рисунок 1.7 – (а): удаленный слой материала, толщиной  $Dz$  (микрометры); (b) скорость удаления материала  $DV$  ( $10^{-3}$  кубических миллиметров в секунду) [16]

В работе [17] исследовано влияние на процесс лазерной гравировки (ширину, глубину и контраст выгравированной зоны) таких параметров, как поток вспомогательного газа (3-15 лит/мин), расфокусировка (0-2 мм), частота следования импульсов (1-5 килогерц) и ток накачки (12,5-18,5 А). Авторы использовали Nd: YAG-лазер с длиной волны 1064 нм. Образцы материала созданы из Al-SiC. В качестве вспомогательного газа в процессе лазерной гравировки использовался азот. На рисунке 1.8 показана зависимость ширины гравировальной зоны (по вертикали) от тока накачки и расфокусировки. Для других параметров зоны гравировки в работе [17] представлены подобные зависимости. Авторами установлено, что расфокусировка имеет наибольшее значение для всех трех параметров лазерной гравировки. Для ширины и контраста выгравированной зоны также большое значение имеет ток накачки, а для глубины – частота следования импульсов.

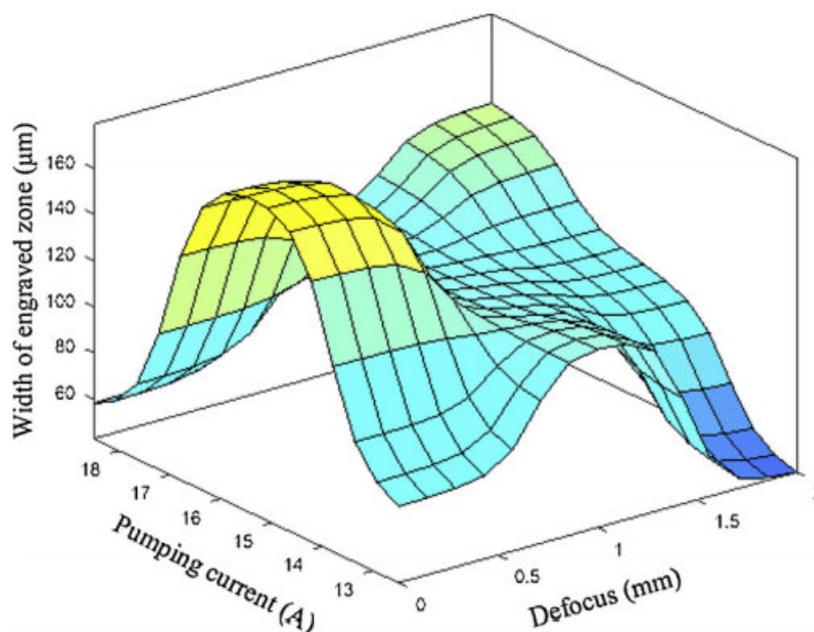


Рисунок 1.8 – Оценка ширины (микрометры) гравировальной зоны при помощи метода ANFIS [17]

### 1.2.1 Глубокая лазерная гравировка

С появлением нового класса установок с волоконными лазерами с существенной энергией импульса и длительностью импульса 100-200 нс

появилась глубокая гравировка. Она стала неким промежуточным типом ЛО металлов между маркировкой (поверхностной обработкой) и обычными технологиями, которые работают в очень длинном импульсе (миллисекундная область). Процесс обработки материалов при глубокой лазерной гравировке идентичен способу при обычной гравировке, отличие заключается только в глубине обработки. При обычной лазерной гравировке удаляется часть материала толщиной до 0,5 мм, при глубокой – до 3,5 мм [2] [10]. При воздействии на поверхность материала излучением высокой мощности тепло должно уходить внутрь посредством теплопроводности, за счет чего материал будет прогреваться, закипать и испаряться. Но если процесс лазерного воздействия будет происходить подобным образом, то для всех материалов заглубливание будет небольшим за время импульса. Для объяснения процесса, происходящего при глубокой лазерной гравировке используют модель заглубливающегося источника тепла в приложении к миллисекундным импульсам или свободной генерации. Суть этой модели заключается в следующем: когда материал начинает подплавляться в поверхностном слое под воздействием лазерного излучения, он начинает кипеть. Так как основная (наибольшая) интенсивность идет по оси лазерного луча, то в центральной части формируется мощный разлетающийся факел, который создает реактивную отдачу и выдавливает расплав из лунки на поверхность и снова дно лунки начинает греться. Затем снова выдавливается новая порция расплава и снова греется дно лунки. То есть источник тепла является не поверхностным, по которому греют лазером, а уходящим вглубь материала. За счет этого удастся увеличить глубину обработки материалов. Раньше считалось, что в наносекундной области длительности импульса заглубливающегося источника не образуется и при обработке поверхности происходит незначительное заглубливание. Однако, в рамках бакалаврской работы [10] было показано, что ЗИТ формируется при такой длительности. В результате проведения теплового расчета при воздействии импульса длительностью 100 нс на сталь 40Х было определено, что для испарения полученной массы материала требуется количество энергии,

превышающее значение энергии лазерного импульса. Поэтому не вся масса испаряется, часть остается в виде расплава. Отсюда делаем вывод, что удаление материала происходит в жидкой и в газовой фазе одновременно.

Также было показано, что скорости обработки для алюминия, бронзы, сплава ВК-8 и стали различных марок при одинаковом режиме работы лазера имели различные значения (рис.1.9). Скорость обработки сначала росла с увеличением коэффициента теплопроводности, образовывался заглубляющийся источник тепла, но в определенный момент скорость обработки уменьшилась. Это объясняется тем, что отвод тепла из зоны воздействия лазерного излучения стал слишком быстрым ввиду высокого коэффициента теплопроводности, и оптимальная ванна расплава не успевала образовываться. При низкой теплопроводности также снижается скорость обработки, так как отвода тепла вглубь материала не происходит, он нагревается и за счет высокой концентрации температуры на поверхности испаряется, минуя жидкую фазу. Происходит абляция, которая является самым энергоемким способом обработки.

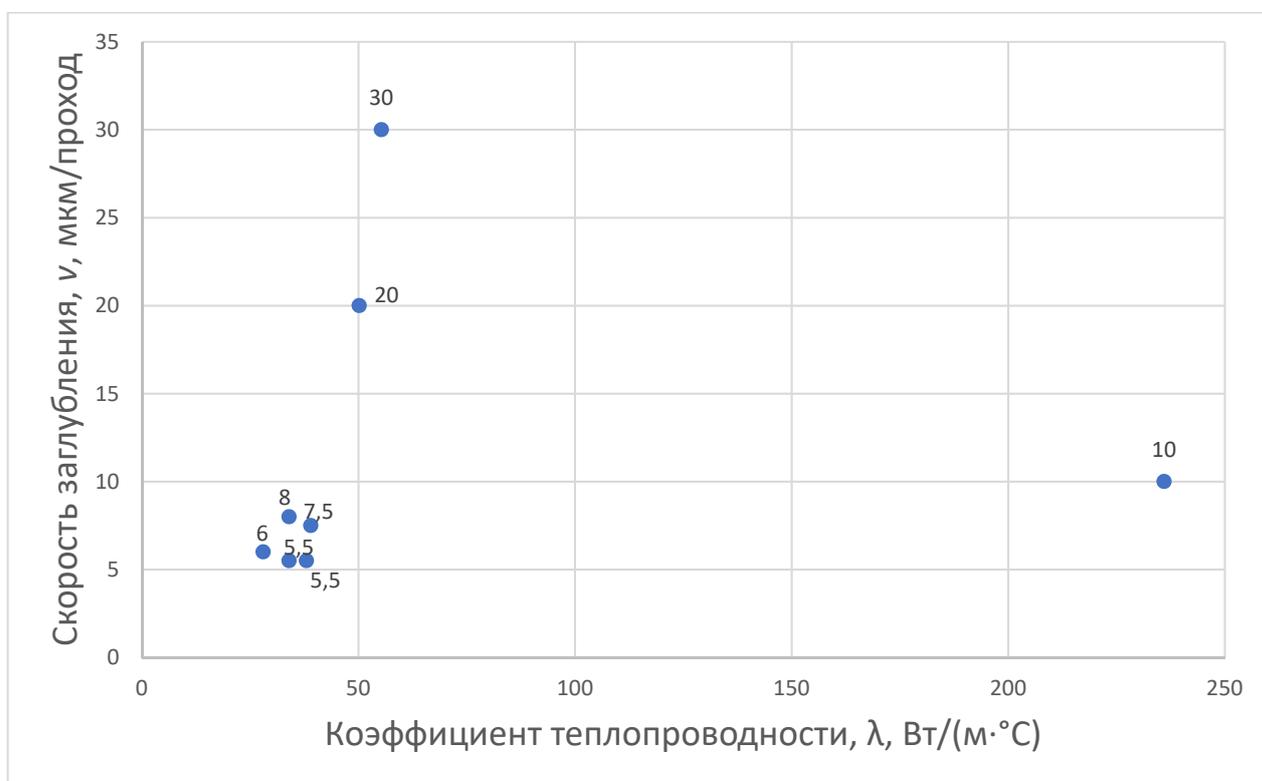


Рисунок 1.9 – Положение различных материалов в координатах скорость заглубления – коэффициент теплопроводности [10]

Данные результаты показывают влияние свойств материала на скорость обработки. Но не меньшее воздействие могут оказывать и внешние условия. Поэтому важно изучить возможные зависимости, а именно влияние изменения давления воздуха.

### **1.3 Влияние газа на процесс лазерной обработки**

При лазерной обработке металлов при длительностях импульса порядка нс и меньше и больших мощностях наряду с плавлением вещества происходит испарение. В центральной части зоны обработки формируется мощный разлетающийся факел. В интервале изменения температуры от температуры плавления до температуры кипения очень быстро растет давление равновесного пара. Температура кипения – это та температура, при которой давление равновесного пара равно давлению окружающего газа. Облако пара, возникающее на пути излучения перед нагреваемой поверхностью, качественно изменяет процесс взаимодействия лазерного излучения с металлом. Во-первых, пары могут эффективно поглощать излучение, экранируя нагреваемую поверхность от источника излучения. Во-вторых, пары могут быть ионизованы под действием излучения, так что поглощать излучение и экранировать металл будут уже не пары, а плазма. Наконец, в-третьих, в плазменном облаке может возникнуть оптический пробой [11]. Пар, вылетающий из зоны лазерного воздействия, в зависимости от состояния окружающей атмосферы (давление, состав) будет испытывать различное сопротивление. Можно предположить, что при пониженном давлении облако пара будет легче вылетать из зоны воздействия и заглубление лазерного луча вглубь материала будет более быстрым, но, с другой стороны, факел не будет испытывать подпора (слой сжатого воздуха) (рис.1.10) сверху и не будет давить на дно лунки, что приведет к снижению эффективности выдавливания расплава из зоны воздействия, и, как следствие, будет происходить послойное удаление материала, что снизит скорость обработки ввиду большего энергозатрата. Какой из описанных

процессов будет доминирующим, мы не знаем, поэтому важно провести ряд экспериментов и выяснить это.

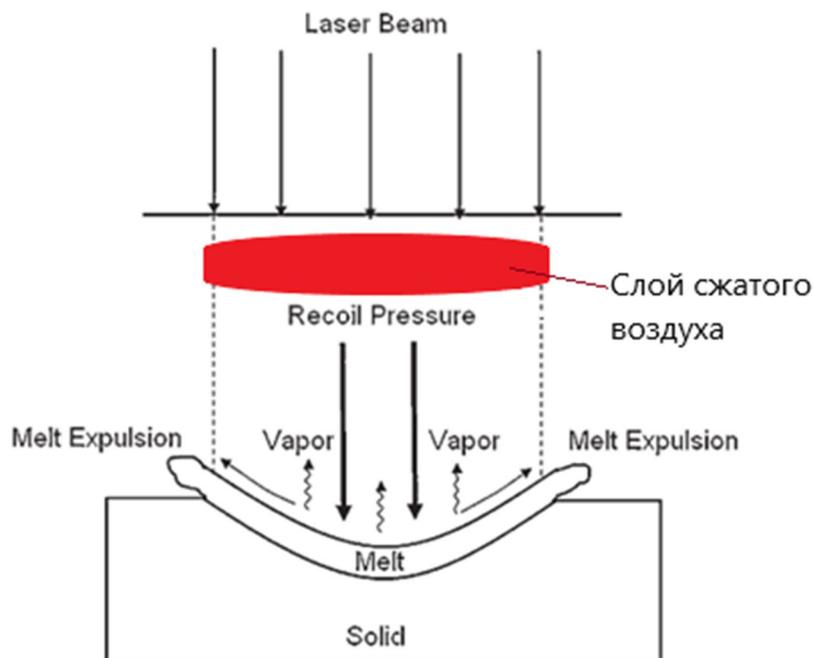


Рисунок 1.10 – Формирование слоя сжатого воздуха

Еще один фактор, который надо принимать во внимание в наиболее распространенном случае плавления металлов лазерным излучением в воздухе, – это процесс окисления поверхностного слоя и изменение коэффициента отражения излучения, обусловленное окислением [11].

Исходя из этого можно предположить, что давление и состав атмосферы могут оказывать сильное влияние на скорость обработки материалов. Поэтому важно изучить данный момент.

В работе [12] изучено влияние струи вспомогательного газа, которая удаляет расплав из зоны резки, на качество резки. Например, на максимальную скорость резания оказывают влияние такие параметры, как давление газа, диаметр выходного сопла и расстояние до него [12]. На рисунке 1.11 (а), (b) и (с) по горизонтали отложены значения давления вспомогательного газа (бар), диаметра выходного сопла (миллиметры) и расстояния до сопла (миллиметры) соответственно; по вертикали – значения максимальной скорости резания (миллиметры в минуту); испытания проводили при мощности лазера 1000, 1500

и 2500 ватт (рис. 1.11(a)), давления газа 2, 5, 10 бар (рис. 1.11 (b)) и 4 и 10 бар (рис. 1.11 (c)).

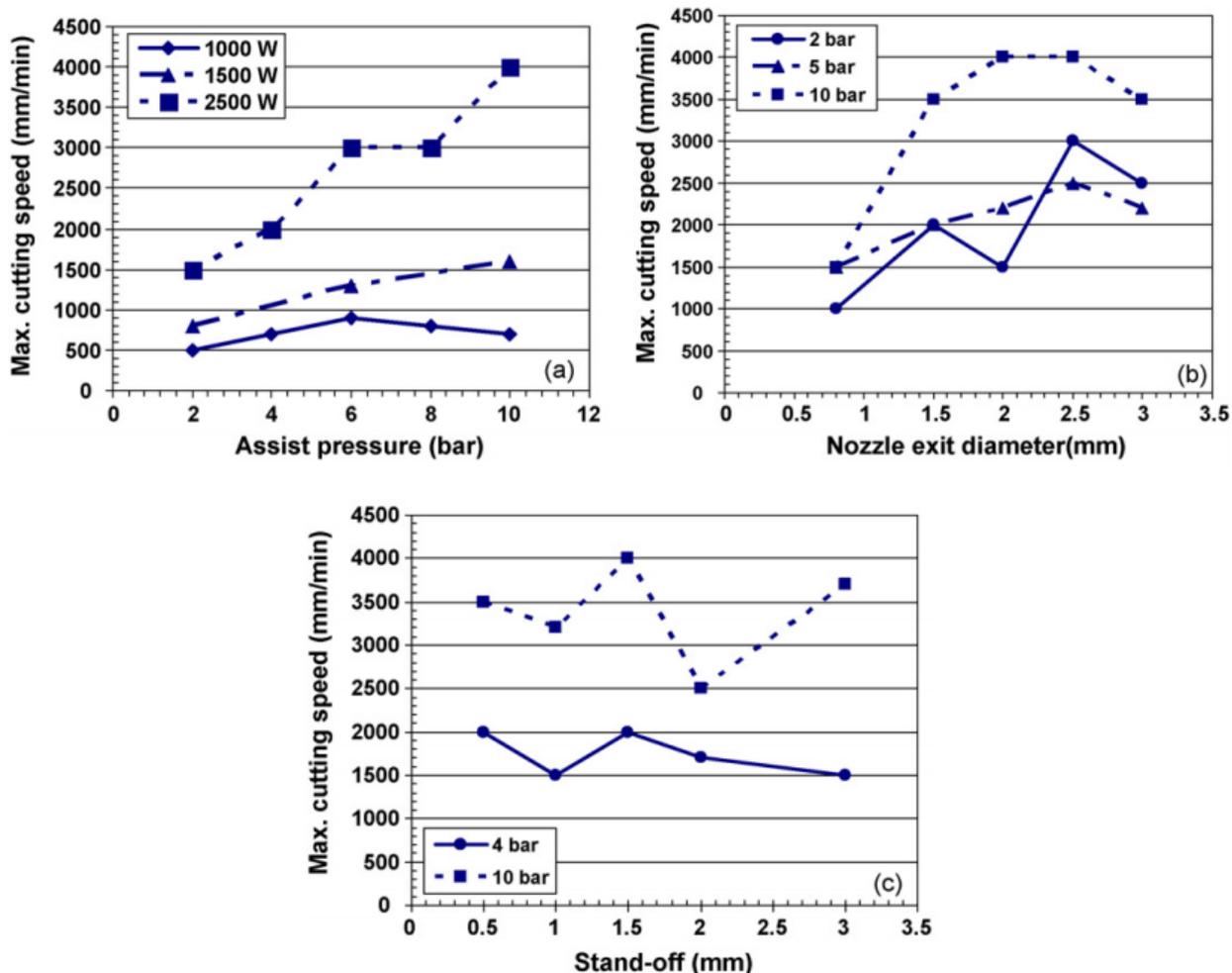


Рисунок 1.11 – Влияние параметров вспомогательного газа: (a) давление, (b) диаметр выходного сопла и (c) расстояние до сопла, на максимальную скорость резания [12]

Увеличение максимальной скорости резания наблюдается при увеличении давления вспомогательного газа и также зависит от мощности лазера (рис. 1.11 (a)). Это связано с тем, что при увеличении давления газа его скорость увеличивается, что в свою очередь означает, что импульс, передаваемый расплавленному материалу посредством вязкого трения, также будет выше. Зависимость от уровня мощности лазера объясняется изменением вязкости расплавленного материала: при более высокой мощности лазера средняя температура расплавленного материала также будет выше. При этом вязкость

расплавленного материала будет снижаться, что облегчит его удаление из зоны резания вспомогательным газом. С другой стороны, оптимальный диапазон диаметра сопла позволяет максимизировать скорость резания (рис. 1.11(b)). Выходные диаметры в диапазоне от 2 до 2,5 мм максимизируют скорость резания. Также требуется точная регулировка расстояния до сопла, поскольку между данным параметром и максимальной скоростью резания наблюдается нелинейная зависимость (рис. 1.11 (c)) [12].

В работе [13] показано влияние давления вспомогательного газа на толщину расплавленного слоя (рис. 1.12). Как видно из графика, увеличение давления приводит к уменьшению толщины расплавленного слоя. То есть, расплав быстрее удаляется из зоны лазерного воздействия и приводит к увеличению скорости обработки, что, в частном случае, подтверждается в вышеупомянутой работе [12].

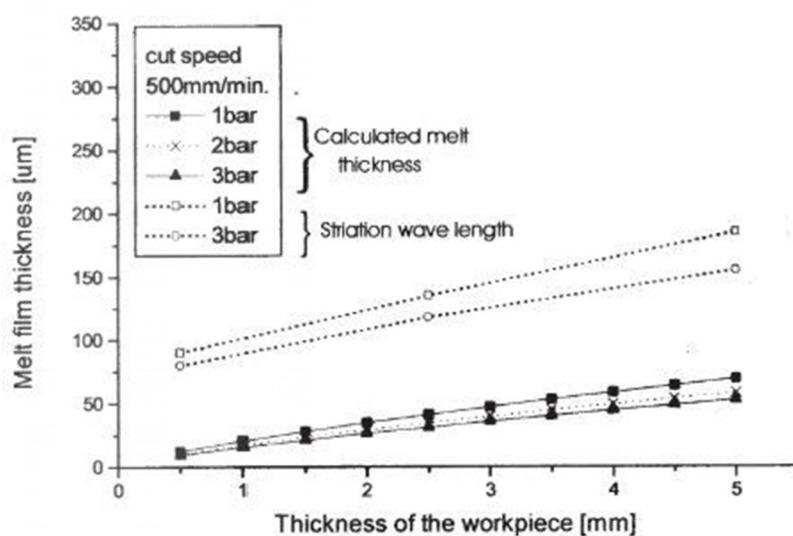


Рисунок 1.12 – Изменение толщины пленки расплава в зависимости от давления газа [13]

Использование различных газов при лазерной обработке по-разному влияет на процесс. К примеру, использование кислорода может вызвать окисление металла, что приведет к появлению ржавчины через короткий промежуток времени. Применение же азота или аргона исключает данное

нежелательное последствие, поскольку эти газы инертны и не реагируют ни с одним из компонентов металла [14].

В работе [15] показано влияние природы вспомогательного газа на производительность резки. На рис.1.13 по оси X отложена мощность лазера, по оси Y скорость резания (мм/мин) (а) и снижение скорости резания в % (b). Экспериментальные тесты, проведенные авторами для оценки влияния вспомогательного газа на производительность резания (здесь количественная оценка скорости резания), показали, что наиболее эффективным газом является аргон, затем кислород, сжатый воздух и, наконец, азот (см. рис. 1.13(a)). Следствием использования вспомогательного газа, отличного от аргона, является снижение скорости резки, как показано на рис. 1.13(b).

Кроме того, химическая реакция чистого кислорода с алюминием дает больше энергии, чем химическая реакция окисления железа [15].

Этот факт означает, что скорость резания сталей существенно снижается по сравнению с алюминиевыми сплавами. С другой стороны, азот также может экзотермически реагировать с расплавленным алюминием при температурах выше 830°C, в том же порядке фронта резания, что и при окислении материала. Однако снижение еще более выражено, чем в случае использования кислорода в качестве вспомогательного газа. Среднее снижение по сравнению со значениями, полученными при использовании в качестве вспомогательного газа аргона, составляет: 37 % для кислорода, 70 % для сжатого воздуха. и 72 % для азота. Следовательно, азот является вспомогательным газом, который в большей степени влияет на скорость резания; однако это снижение аналогично тому, которое происходит при использовании сжатого воздуха. Наконец, можно заметить, что снижение скорости резки не зависит от мощности лазера в случае использования азота или сжатого воздуха; однако это снижение зависит от мощности лазера при использовании кислорода [15].

Что касается ширины пропила, использование сжатого воздуха приводит к увеличению пропила, в то время как аргон — это газ, который дает наименьший пропил для рассматриваемого диапазона мощностей лазера (рис.1.14). Кислород

и азот также создают пропилы большего размера, чем в случае использования аргона [15].

Использование кислорода и сжатого воздуха, наиболее реакционноспособных газов с расплавленным алюминием, приводит к наиболь-

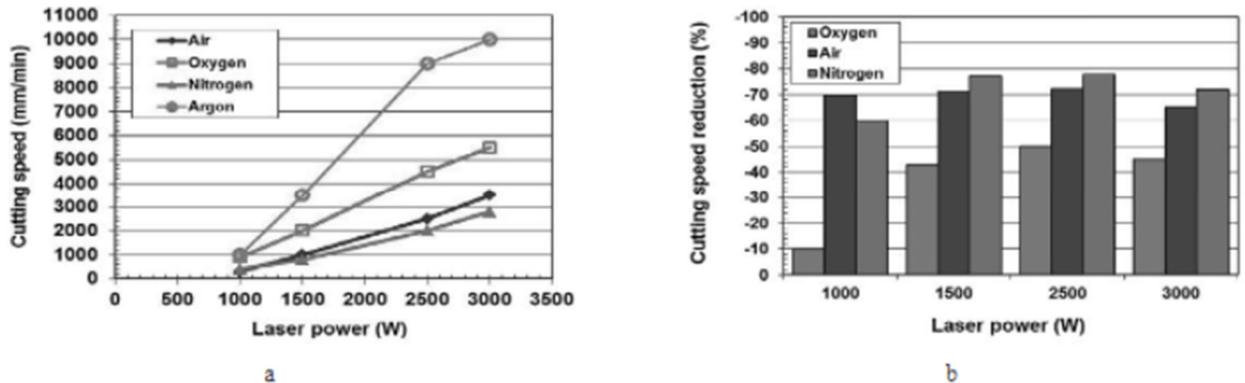


Рисунок 1.13 – (a) Максимальная скорость резки в зависимости от мощности лазера для рассматриваемых вспомогательных газов; (b) Снижение скорости резания как следствие использования вспомогательного газа, отличного от аргона [15]

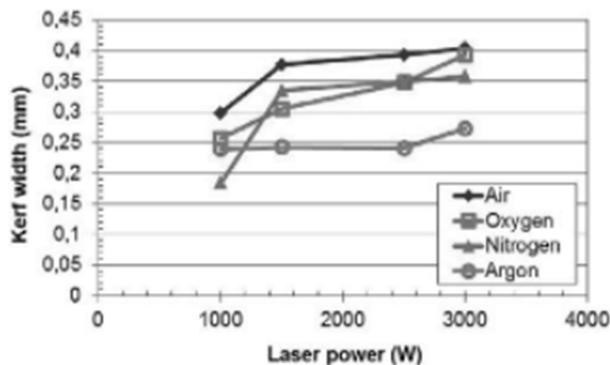


Рисунок 1.14 – Влияние мощности лазера на ширину пропила для рассматриваемых вспомогательных газов: сжатого воздуха, кислорода, азота и аргона [15]

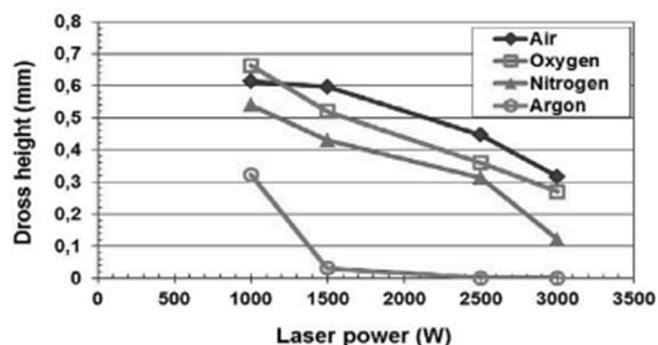


Рисунок 1.15 – Эволюция высоты окалины (измеренной от нижней части заготовки) в зависимости от мощности лазера для рассматриваемых вспомогательных газов [15]

шему образованию окалины. С другой стороны, использование азота снижает уровень окалины; однако аргон является единственным газом, способным производить резку без окалины, как показано на рис. 1.15 [15].

В работе [18] показано влияние технологического газа на качество абляции при нс -лазерной абляции. Авторами показано, что такие газы, как аргон или азот, защищают рабочую зону от кислорода. Следовательно, происходит меньше экзотермических реакций, а диаметр сверления меньше, чем при использовании сжатого воздуха или без газа при тех же параметрах процесса. Видно, что область повторного отложения аблированного материала и цвет переотложенного материала различаются. Для аргона он серый, а для азота меняется от серого к черному. Площадь переосажденного материала больше для азота, чем для аргона. Цвет повторно осажденного материала красно-коричневый для сжатого воздуха. Переосажденный материал покрывает большую площадь при абляции сжатым воздухом за счет эффекта экзотермическая реакция, чем с аргоном. Внешний вид стенок просверленных отверстий со сжатым воздухом отличается от стенок с защищенными от кислорода технологическими газами. Угол боковых стенок при сверлении отверстия сжатым воздухом для алюминия меньше. Результаты показывают, что самую маленькую скважину с меньшим количеством повторно отложенного материала на поверхности можно создать с помощью инертного газа.

Наименьший боковой угол достигается с газом, имеющим коэффициент теплопроводности и удельную теплоемкость менее  $27 \cdot 10^{-3}$  (г · с)/м, например, сжатым воздухом или азотом. Чтобы получить скважину хорошего качества с ровными боковыми стенками и высокой скоростью абляции, во время процесса должна происходить экзотермическая реакция. Таким образом, сверление сжатым воздухом является наиболее эффективным процессом для использованной нержавеющей стали и алюминия.

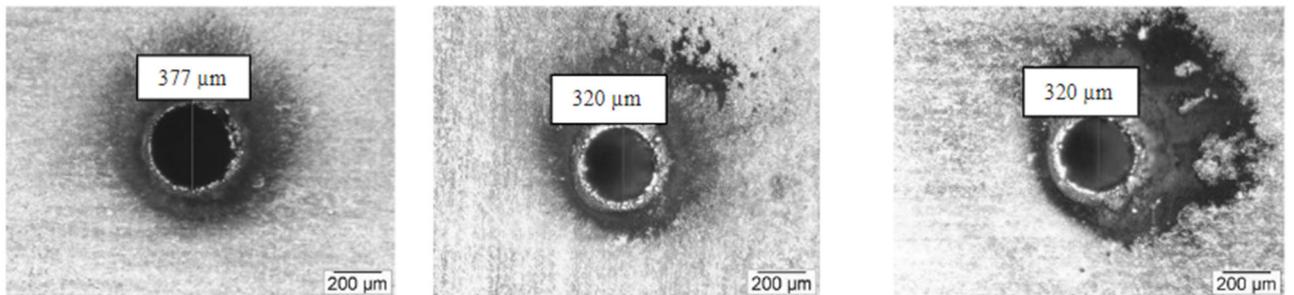


Рисунок 1.16 - Алюминий,  $d = 260$  мкм: (а) сжатый воздух; (б) аргон; (в) азот

[18]

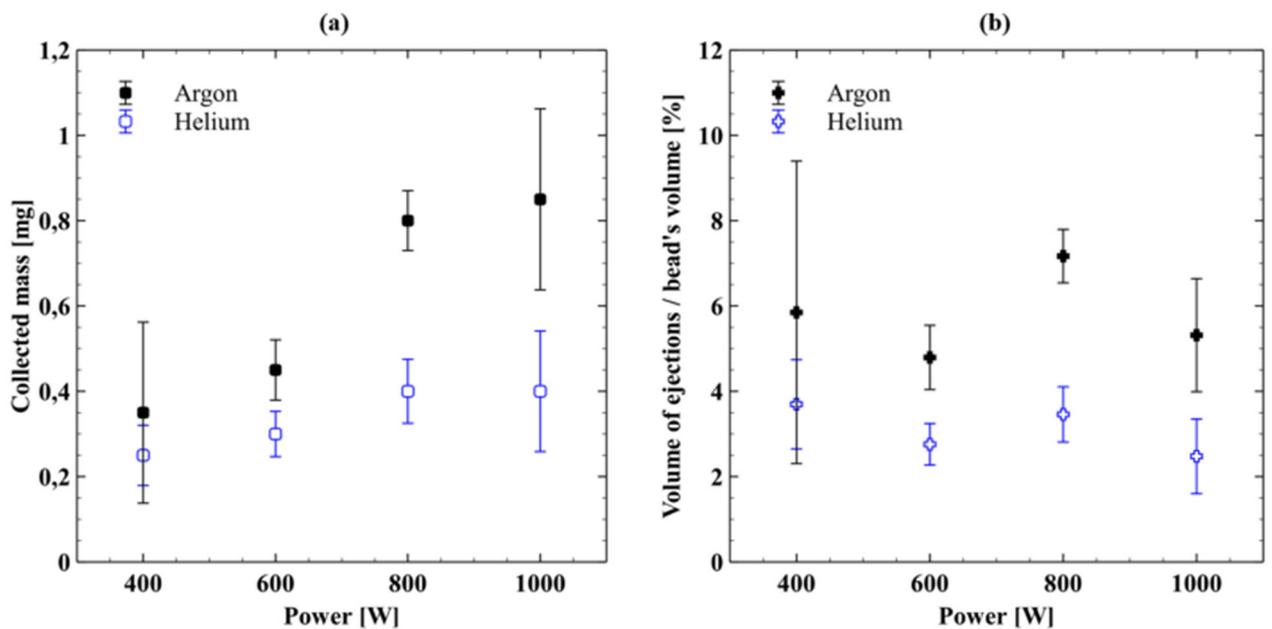


Рисунок 1.17 - (а) Масса выброшенных частиц, собранных для шариков, реализованных при  $P_0 = 400, 600, 800$  и  $1000$  Вт при  $V_0 = 0,5$  м/с под защитой Ar и He, (б) соответствующие объемные доли (отнесенные к общему объему шариков) [19]

В работе [19] показано влияние газовой атмосферы (Ar или He) на расплавление сплава на основе никеля лазерным порошком. Авторами было показано, что переключение газовой атмосферы с аргона на гелий в производственном процессе влияет на основные явления, окружающие ванну расплава, такие как испарение материала, разбрызгивание или оголение порошка. При защите гелием наблюдалось уменьшение разбрызгивания, увеличение скорости парового шлейфа и изменение состава пара (меньшие наночастицы из-за более высокой теплопроводности) (рис.1.17). Более низкая плотность гелия также способствовала явлению денудации из-за более высокой скорости индуцированного потока газа, создавая большие построенные объемы (но не большие объемы расплавленного), чем в аргоне.

Работ, посвященных влиянию газа на процесс лазерной обработки, не много, в основном это струя вспомогательного газа. Нас же интересует именно влияние атмосферы на процесс. В связи с этим в рамках данной диссертации необходимо разработать экспериментальную схему и провести серию экспериментов в условиях повышенного и пониженного давления, а также проанализировать полученные зависимости.

## 2 Объекты и методы экспериментального исследования

### 2.1 Исследуемые образцы Al, латунь, сталь 40Х, свинец, оловянно-свинцовый припой ПОС60

В рамках выполнения данной дипломной работы использовались такие материалы, как алюминий, латунь, сталь 40Х, свинец и оловянно-свинцовый припой ПОС60.

Алюминий. Простое вещество алюминий – это неферромагнитный металл и чрезвычайно легкий (он имеет очень низкую плотность), что делает его идеальным для многих промышленных применений. Алюминий обладает высокой тепло- и электропроводностью, сопротивлением к коррозии за счёт быстрого образования прочных оксидных плёнок, защищающих поверхность от дальнейшего взаимодействия, низкой степенью токсичности [20].

Таблица 2.1 – Физические свойства алюминия [20]

Твердость по Бринеллю	30 НВ
Плотность	2697 кг/м <sup>3</sup>
Температура плавления	660 °С
Коэфф. теплопроводности	236 Вт/(м·град)
Теплоемкость	897 Дж/(кг·град)

Латунь – это сплав, состоящий из меди и цинка. Этот сплав выглядит как золото за счет желтоватого цвета. Его состав: 33% цинка и 67% меди. Его также называют «Желтая латунь». Латунь не обладает магнитными свойствами, поэтому не является ферромагнитной. Устойчива к коррозии и потускнению, обладает низким коэффициентом трения. Медь обладает бактерицидными свойствами, которые унаследованы и латунью. [21]

Таблица 2.2 – Физические свойства латуни [21]

Твердость по Бринеллю	70 НВ
Плотность	8600 кг/м <sup>3</sup>
Температура плавления	910 °С
Коэфф. теплопроводности	121 Вт/(м·град)
Теплоемкость	377 Дж/(кг·град)

Сталь. Сталь – сплав железа и углерода, в котором содержание углерода составляет до 2 процентов (при более высоком содержании углерода материал определяется как чугун). Основным компонентом стали является железо, металл, который в чистом виде ненамного тверже меди. В чистом виде железо мягкое и, как правило, не используется в качестве инженерного материала; основной метод его укрепления и превращения в сталь заключается в добавлении небольшого количества углерода [22]. С повышением содержания углерода в стали возрастает ее твердость, прочность и уменьшается пластичность и вязкость [23].

Таблица 2.3 – Химический состав в % стали 40X [24]

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	S	P	Cu	Примечание
0,36	0,17	0,5-	0,8-	≤0,	≤0,	≤0,	≤0,	≤0,	≤0,	≤0,	Ti
-	-	0,8	1,1	15	3	05	2	035	035	3	≤0,03
0,44	0,37										N
											≤0,008

Таблица 2.4 – Свойства стали 40X [24]

Твердость по Бринеллю	217 НВ
Плотность	7767 кг/м <sup>3</sup>
Температура плавления	1485°С
Температура кипения	3000°С

Коэфф. теплопроводности	34 Вт/(м·°С)
Теплоемкость	572 Дж/(кг·°С)

Свинец – это тусклый серебристо-серый металл. Он мягкий и легко превращается в листы. Этот легко обрабатываемый и устойчивый к коррозии металл [25]. Он плотный, податливый и легкоплавкий. Его свойства включают низкую температуру плавления; легкость литья; высокая плотность; низкая прочность; простота изготовления; кислотостойкость; электрохимическая реакция с серной кислотой; химическая устойчивость в воздухе, воде и почвах; и способность ослаблять звуковые волны, атомное излучение и механическую вибрацию [26].

Таблица 2.5 – Свойства свинца [26]

Твердость по Бринеллю	18 НВ
Плотность	11350 кг/м <sup>3</sup>
Температура плавления	327°С
Температура кипения	1770°С
Коэфф. теплопроводности	34,7 Вт/(м·°С)
Теплоемкость	127,5 Дж/(кг·°С)

Оловянно-свинцовый припой ПОС60 представляет тонкую проволоку металлического цвета. Химический состав припоя ПОС 60 включает наличие олова (Sn) 60% и свинца (Pb) 39-40% [27]. Обладает хорошими электротехническими свойствами и малым удельным сопротивлением. С повышением количество олова в составе снижается и температура плавления, так что данную марку можно отнести к легкоплавким материалам. Благодаря этому повышается не только простота работы, но и текучесть.

Таблица 2.6 – Свойства оловянно-свинцового припоя ПОС60 [27]

Твердость по Бринеллю	14,9 НВ
-----------------------	---------

Плотность	8500 кг/м <sup>3</sup>
Температура плавления	190°С
Коэфф. теплопроводности	0,117 Вт/(м·°С)
Удельное сопротивление	0,137 Ом/м

## 2.2 Лазерная система

Эксперименты по глубокой лазерной гравировке проводились на лазерном маркере «МиниМаркер 2-20А4» (рис.2.1). Это компактный прецизионный маркер на базе волоконного лазера с улучшенными параметрами лазерного излучателя. Данная лазерная система позволяет регулировать длительность и частоту следования импульсов, а также скорость перемещения луча в широком диапазоне значений. В специализацию данного маркера входит следующее: удаление покрытий, трехмерная лазерная гравировка, создание топологий для микроэлектроники, нанесение фотореалистичных изображений, прецизионная маркировка сувениров и микромаркировка и маркировка с высоким разрешением различной информации: штрих-кодов и бар-кодов, логотипов, фотографий, цифро-буквенной информации [28].



Рисунок 2.1 – Лазерный маркер «МиниМаркер 2» [28]

Таблица 2.7 – Технические характеристики системы МиниМаркер 2-20А4

[28]

Лазерный излучатель	
Тип лазера	специализированный иттербиевый импульсный волоконный лазер IPG-Photonics
Ресурс лазера	более 100000 часов
Средняя выходная мощность лазера	20 Вт
Длина волны лазерного излучения	1,064 мкм
Длительность импульсов	4,8,14,20,30,50,100,200 нс
Частота следования импульсов	регулируемая, 1,6 кГц до 100 кГц
Максимальная энергия в импульсе	1,0 мДж
Охлаждение	автономное воздушное
Система перемещения	
Сканирующее устройство	2-х осевой сканатор (Cambridge Technology)
Поле обработки	50×50 мм, 110×110 мм, 160×160 мм, 250×250 мм (сменные объективы)
Программно-аппаратное разрешение	2,5 мкм
Скорость перемещения луча	регулируемая, до 8,7 м/с
Минимальная толщина линии	8 мкм
Размер знаков	от 0,1 до 100 мм
Ширина линии с автоматическим заполнением	до 3 мм

Скорость маркировки и используемый объектив зависят от поля обработки. Первый параметр может достигать более 20000 мм/с при максимальном поле маркировки [28].

## 2.3 Вакуумная камера

Для проведения серии экспериментов в условиях повышенного и пониженного давления, разработали и создали вакуумную камеру (рис.2.2). Сама камера представляет собой блок из стали 3 с выбранной в нем цилиндрической полостью с двумя окошками по бокам и 4 просверленными отверстиями с резьбой под болты. Сверху имеется круглое отверстие, на котором расположена крышка из оптического стекла, через которую проходит луч лазера. При создании пониженного и повышенного давления использовали различные крышки. В первом случае это стеклянная пластина, которая ничем не фиксируется. Во втором случае это толстая крышка из акрилового стекла, которая фиксируется 4 болтами. Камера расположена на фиксирующем столике с помощью эпоксидного клея. Столик расположен на 4 лапках и фиксируется на лазерном столе барашковыми гайками. Для откачки воздуха используется форвакуумный насос с механическим вакуумметром, подключенный к камере (для создания пониженного давления) или ручной насос с манометром (для создания повышенного давления). С другой стороны камеры расположен клапан для ограничения давления в камере или сброса давления при превышении порогового значения 3 а.т.и., а также заполнении воздухом камеры при работе в режиме откачки. Также здесь может быть расположен кран для подачи газа (есть возможность проведения экспериментов в атмосфере различных газов). Крышки и боковые стекла изготовлены из оргстекла. Вакуумметр используется для контроля пониженного давления, манометр – для измерения избыточного давления.

Герметичность создается за счет использования эпоксидного клея для фиксации боковых окошек. В жидком состоянии такой клей растекается и заполняет все возможные пробелы. Застывая, создает надежную фиксацию элементов и не допускает утечек или проникновения воздуха извне. С этой же целью использовалась прокладка между корпусом камеры и крышкой. Прокладка изготавливалась из силикона путем его заливки в специально

вырезанное отверстие в камере. Резьбовые трубные соединения уплотнены сантехнической подмоткой из полиамидной нити.

Сборка камеры производилась лично вручную с помощью научного руководителя.

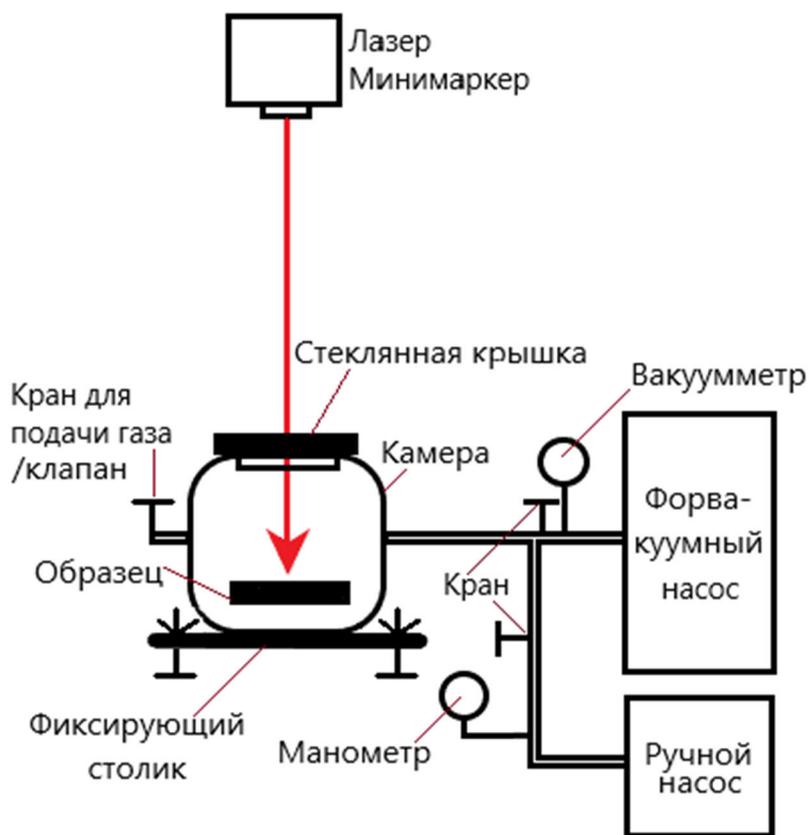
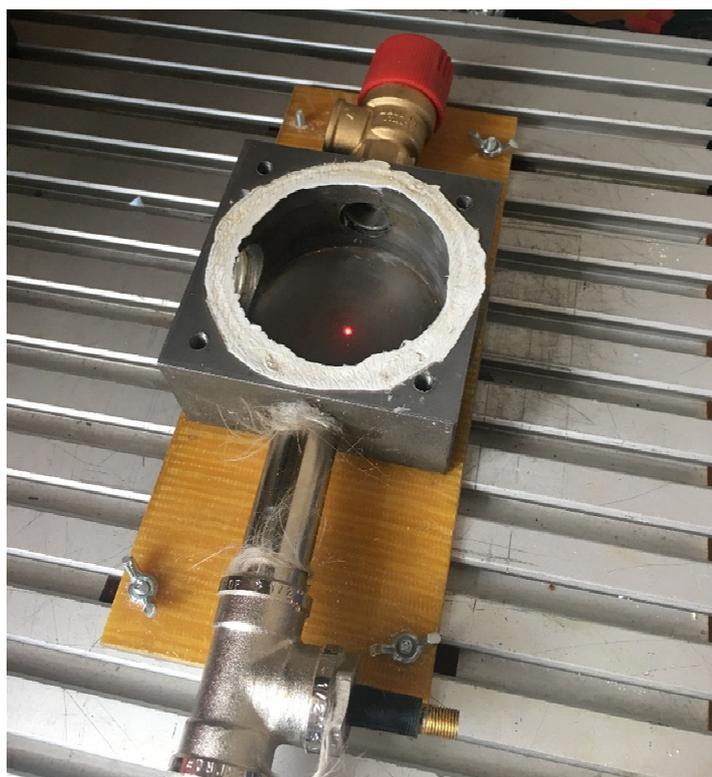


Рисунок 2.2 – Экспериментальная схема



(a)



(б)

Рисунок 2.3 – Вакуумная камера: (а) для экспериментов при повышенном давлении; (б) без верхней крышки

## 2.4 Методы экспериментального исследования

В ходе выполнения дипломной работы была проведена глубокая лазерная гравировка при повышенном, пониженном и атмосферном давлении для 5 материалов – алюминий, латунь, сталь 40Х, свинец и оловянно-свинцовый припой ПОС60 (рис 2.4). Обработка проводилась при следующих режимах работы лазера:

- $\tau = 200/100/50$  нс – длительность импульса;
- $V = 20$  кГц – частота следования импульсов;
- $U = 100$  мм/с – скорость перемещения луча;
- $P = 100\%$  (20 Вт) – мощность;
- 30 проходов лазера.

Значения давлений при экспериментах в условиях пониженного давления были следующие: атмосферное давление, -990 mbar, -800 mbar, -500 mbar.

Значение давления при экспериментах в условиях повышенного давления были следующие: 200 кПа = 0,2 Мпа = 2000 mbar.

На каждом образце гравировался квадрат с размерами 4,8x4,8 мм.

При пониженном давлении использовали крышку из оптического стекла. Этого достаточно для создания нужного уровня давления, которое регулировалось клапаном. При включении форвакуумного насоса крышка прижималась к прокладке атмосферным давлением, не допуская проникновения воздуха извне.

При повышенном давлении использовали крышку из пластины толщиной 15 мм из акрилового стекла с рабочим окном из кварцевого стекла. Также фиксировали боковые окошки зажимами. Это необходимо для того, чтобы крышку и окошки не выбило, так как изначально камера предназначалась для работы в режиме вакуума.

В первой серии экспериментов при пониженном давлении использовали форвакуумный насос, который откачивал воздух из камеры. Вакуумметр

измерял давление в камере. При достижении необходимых значений проводилась глубокая лазерная гравировка образцов (рис.2.5).

Повышенное давление создавалось с помощью ручного насоса. Манометр показывал значений давления в камере. При достижении 2000 mbar проводилась глубокая лазерная гравировка образцов (рис.2.3 (а)). Более высокое давление крышка не выдержит.

После данных экспериментов производились замеры глубин в местах лазерного воздействия с помощью механического индикатора перемещений (рис.2.6).

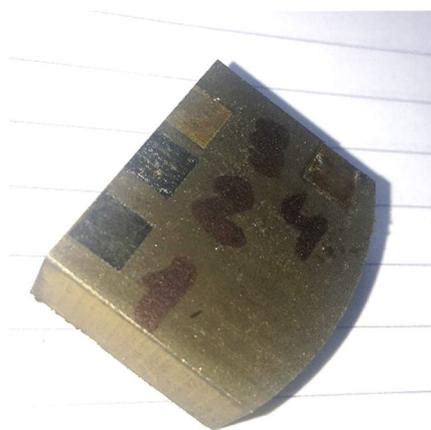
Также проводились эксперименты по улавливанию разлетающегося из зоны обработки факела. Для этого использовали тонкие стеклянные пластинки, присоединенные к крышке камеры (рис.2.7).



(а)

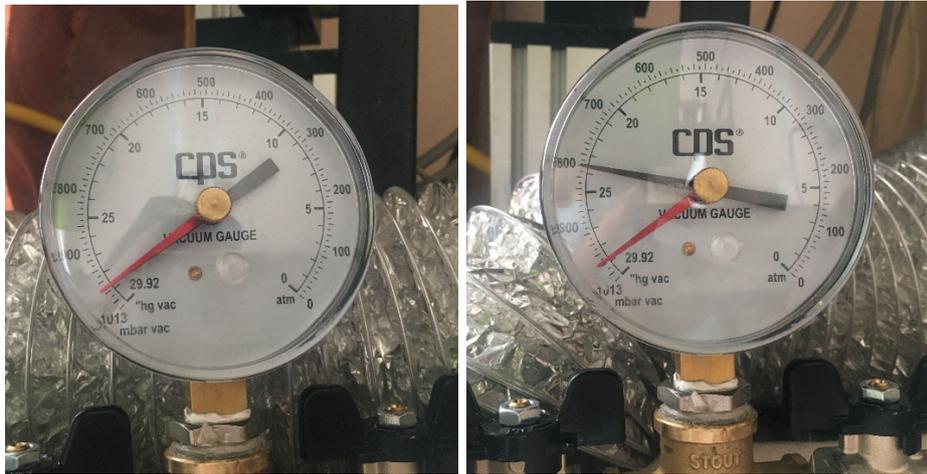


(б)



(в)

Рисунок 2.4 – Образцы: (а) латунь; (б) алюминий; (в) нержавеющая сталь



(a)

(б)

Рисунок 2.5 – Показания вакуумметра: (а) при полной откачке (-990 mbar); (б) при давлении -800 mbar



Рисунок 2.6 – Измерение глубин в местах лазерного воздействия с помощью механического индикатора перемещений



Рисунок 2.7 – Пример улавливания факела тонким стеклышком

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

**Тема:** «Физические процессы, сопутствующие глубокой лазерной гравировке металлов».

### **Краткое описание**

Выпускная квалификационная работа посвящена исследованию взаимодействия лазерного излучения с различными металлическими материалами, которые являются одними из самых востребованных в промышленности и жизни людей на сегодняшний день. Основой исследования является процесс взаимодействия лазерного излучения с веществом при глубокой лазерной гравировке металлических материалов. С помощью данного метода обработки материалов обеспечивается получение в изделиях изображений с прецизионной точностью и высочайшим качеством. Полученные в ходе исследований данные смогут лечь в основу процессов обработки металлических материалов с помощью лазерного излучения.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

## **4.1 Предпроектный анализ**

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

В рамках данной выпускной работы исследовано взаимодействие лазерного излучения с веществом при различных внешних условиях, а именно, при изменении давления.

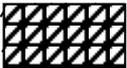
Исходя из особенностей технологии, можно судить о круге лиц, которые потенциально будут заинтересованы в разработке. Целевым рынком нынешней разработки являются производственные предприятия, которые заинтересованы в увеличении объемов производства и спроса на продукцию за счет увеличения темпов обработки материалов и качества выпускаемой продукции. Все компании, нуждающиеся в автоматизации процесса обработки материалов, будут заинтересованы в такого рода технологическом процессе. Однако, в силу наличия ранее не изученных условий обработки, работа может быть интересна также для лиц, занимающихся научно-исследовательской деятельностью, связанной с методами лазерной обработки.

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности использования данных методов обработки. Результат сегментирования представлены на таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию лазерных технологий

		Область использования			
		Обработка материалов	Сувенирная продукция	Исследовательская деятельность	Автоматизация процессов
Размер компании	Крупные	[Grid Pattern]			
	Средние	[Grid Pattern]			
	Мелкие				

	Фирма А		Фирма Б		Фирма В
---	---------	---	---------	---	---------

#### 4.1.2 Анализ конкурентных решений

Данная технология обработки материалов является уникальной в своем роде, так как содержит в себе множество преимуществ, таких как точность, скорость, качество обработанной поверхности, минимальное количество отходов, широкий диапазон обрабатываемых материалов и т.д. Поэтому в качестве конкурента был рассмотрен похожий метод обработки материалов. Основным конкурентом лазерного метода обработки является механическая обработка металлов. В нее входит: 1. фрезерование; 2. резание; 3. шлифование и т.п. Выберем указанные три метода обработки. Здесь речь идет о механическом воздействии на материал, вследствие которого он принимает необходимые размеры и форму за счет удаления лишнего с помощью специальных режущих инструментов.

Экспертная оценка основных технических характеристик данных методов представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – оценочная карта сравнения конкурентных технических решений

№	Критерии оценки	Вес критерия	Баллы				Конкурентоспособность			
			Бф	Бк1	Бк2	Бк3	Кф	К1	К2	К3
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>										
1	Повышение производительности и труда пользователя	0,1	5	2	3	3	0,5	0,2	0,3	0,3
2	Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,08	5	3	3	4	0,4	0,24	0,24	0,32
3	Толщина обрабатываемой поверхности	0,05	3	4	5	5	0,15	0,2	0,25	0,25
4	Энергоэкономичность	0,05	4	3	3	3	0,2	0,15	0,15	0,15
5	Надежность	0,05	4	3	3	3	0,2	0,15	0,15	0,15
6	Наличие отходов	0,04	5	2	2	2	0,2	0,08	0,08	0,08
7	Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,1	5	2	3	1	0,5	0,2	0,3	0,1
8	Диапазон типов материалов, которые могут быть обработаны данным методом	0,1	5	4	4	3	0,5	0,4	0,4	0,3
9	Качество обработанной поверхности	0,1	5	2	3	3	0,5	0,2	0,3	0,3
10	Возможность обработки легкодеформируемых и нежестких заготовок или деталей	0,04	5	2	1	3	0,2	0,08	0,04	0,12

1	Раскрой материалов по сложному криволинейному контуру	0,04	5	3	3	4	0,2	0,12	0,12	0,16
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>										
1	Конкурентоспособность технологии	0,08	5	2	2	3	0,4	0,16	0,16	0,24
2	Уровень проникновения на рынок	0,04	3	5	5	5	0,12	0,2	0,2	0,2
3	Цена	0,05	4	2	2	2	0,2	0,1	0,1	0,1
4	Стоимость оборудования	0,02	5	3	3	3	0,1	0,06	0,06	0,06
5	Финансирование научной разработки	0,02	5	2	2	2	0,1	0,04	0,04	0,04
6	Срок выхода на рынок	0,04	3	5	5	5	0,12	0,2	0,2	0,2
	Итого	1	71	49	52	51	<b>3,24</b>	<b>2,78</b>	<b>3,09</b>	<b>3,07</b>

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i = 0,1 \cdot 5 = 0,5,$$

где  $K$  – конкурентоспособность метода;  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – балл показателя.

Как видно из оценочной карты, лазерный метод обработки материалов является весьма конкурентоспособным в обрабатывающей промышленности. Лазерная обработка подобно конкуренту позволяет получать детали нужных форм и размеров. Однако данный метод в сравнении с механической обработкой имеет ограничения, связанные с толщиной обрабатываемых деталей.

Преимуществами перед конкурентом является то, что лазерный метод обработки позволяет обрабатывать материалы с более высокой точностью и скоростью. Отходы при данном методе минимальны или вовсе отсутствуют. Существует возможность обработки материала по сложному криволинейному контуру, что позволяет получать детали абсолютно любых форм и размеров.

Также при лазерном воздействии полностью отсутствует механическое воздействие на обрабатываемый материал, и возникают минимальные деформации, как временные в процессе резки, так и остаточные после полного остывания.

Проведенный анализ конкурентных методов обработки материалов показал, что исследуемый метод является наиболее эффективным и предпочтительным по сравнению с другими конкурентами.

### 4.1.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Матрица составляется на основе анализа рынка и конкурентных технических решений, и показывает сильные и слабые стороны проекта, возможности и угрозы для разработки.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Матрица SWOT представлена в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Матрица SWOT-анализа

<b>Сильные стороны</b>	<b>Слабые стороны</b>
S1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии.	W1. Дороговизна оборудования.
S2. Применимость метода практически ко всем типам материалов;	W2. Высокий уровень опасности метода.
S3. Высокая точность метода.	W3. Необходимость индивидуального подхода для различного типа материалов.
S4. Высокая скорость обработки материалов.	W4. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.

S5. Практически полное отсутствие отходов.	
S6. Квалифицированный персонал.	
<b>Возможности</b>	<b>Угрозы</b>
O1. Увеличение числа сфер деятельности человека, требующих материалов с прецизионной точностью обработки.	T1. Ограничение финансирования со стороны ТПУ.
O2. Расширение возможностей лазерного оборудования в обрабатывающей промышленности.	T2. Развитая конкуренция технологий производства.
O3. Вытеснение конкурентов.	T3. Отсутствие спроса на технологию.
O4. Проведение новых научных исследований.	

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Соотношения параметров представлены в таблицах 5.4-5.7.

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
O1	-	+	+	-	-	+
O2	+	+	+	+	+	+
O3	+	+	+	+	+	-
O4	-	+	-	-	-	+

Таблица 4.5 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

	W1	W2	W3	W4
O1	-	-	-	-

O2	-	-	-	-
O3	-	-	-	-
O4	-	-	+	-

Таблица 4.6 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
T1	+	-	-	-	-	-
T2	+	+	+	+	+	-
T3	-	-	-	-	-	-

Таблица 4.7 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

	W1	W2	W3	W4
T1	+	-	-	-
T2	-	-	+	+
T3	+	+	+	+

Результаты анализа представлены в итоговой таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	<b>Сильные стороны</b>	<b>Слабые стороны</b>
	<p>S1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии;</p> <p>S2. Применимость метода практически ко всем типам материалов;</p> <p>S3. Высокая точность метода;</p> <p>S4. Высокая скорость обработки материалов;</p> <p>S5. Практически полное отсутствие отходов;</p>	<p>W1. Дороговизна оборудования;</p> <p>W2. Высокий уровень опасности метода;</p> <p>W3. Необходимость индивидуального подхода для различного типа материалов;</p> <p>W4. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных</p>

	S6. Квалифицированный персонал.	кадров по работе с научной разработкой.
<p><b>Возможности</b></p> <p>O1. Увеличение числа сфер деятельности человека, требующих материалов с прецизионной точностью обработки;</p> <p>O2. Расширение возможностей лазерного оборудования обрабатывающей промышленности;</p> <p>O3. Вытеснение конкурентов;</p> <p>O4. Проведение новых научных исследований.</p>	<p>O1O2O3O4S2 – лазерная обработка материалов на сегодняшний день применима практически ко всем видам материалов, что дает людям возможность использовать ее во многих сферах, тем самым вытесняя конкурентов имеющимися и перспективными возможностями;</p> <p>O2O3S1S2S3S4S5 – все перечисленные достоинства метода делают его полностью конкурентоспособным. Имеется потенциал для дальнейшего развития;</p> <p>O1S3 – высокая точность обработки материалов играет существенную роль во все большем количестве сфер деятельности людей;</p> <p>O1O2O4S6 – наличие квалифицированного персонала снижает риски данного метода и способствует бесперебойной работе.</p>	<p>O4W3 – проведение новых научных исследований дает знания об особенностях лазерной обработки различных типов материалов.</p>
<p><b>Угрозы</b></p> <p>T1. Ограничение финансирования со стороны ТПУ;</p>	<p>T1S1 – экономичность и энергоэффективность метода и оборудования позволяют снизить затраты</p>	<p>T1T3W1 – поиск дополнительных спонсоров для закупки оборудования</p>

<p>T2. Развитая конкуренция технологий производства; T3. Отсутствие спроса на технологию.</p>	<p>на электроэнергию и опытные образцы; T2S1S2S3S4S5 – данный метод имеет ряд преимуществ перед другими технологиями, и несмотря на дороговизну оборудования является одним из наиболее применяемых на сегодняшний день.</p>	<p>поможет решить денежный вопрос; T2T3W3W4 – обучение персонала или наем обученных специалистов будут способствовать внедрению данного метода на многие производства; T3W2 – использование мер защиты и</p>
		<p>обучение персонала снижают риск получения травмы.</p>

В результате SWOT-анализа показано, что преимущества исследуемого метода преобладают над его недостатками. Данные недостатки имеют возможности для их устранения.

#### 4.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в табл. 4.9.

Таблица 4.9 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
-------	--------------	--	---

1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	5
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	3	4
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	2
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	3	2
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	2
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	3
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	4
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	5	5
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	2	2
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	3
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	3
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	2	2
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	47	49

Итоговые значения проработанности научного проекта и знания у разработчика лежат в диапазоне от 45 до 59, что говорит о перспективности проекта выше средней. Однако, многие аспекты вывода продукта на рынок не были учтены, а также проявляется недостаток знаний. Следовательно, требуется

дополнительные затраты на наём или консультации у соответствующих специалистов.

#### **4.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования**

Перспективность данного научного исследования выше среднего, поэтому не все аспекты рассмотрены и изучены. Таким образом, для организации предприятия этого недостаточно (пункт 4 – 8 не подходят). Но так как основной научно-технический задел определен, этого достаточно для коммерциализации для следующих методов (пункты 1 - 3): Торговля патентной лицензией; передача ноу-хау и инжиниринг. Степени проработанности научного проекта и уровень знаний разработчика (выше среднего) достаточно для реализации выбранных пунктов.

#### **4.1.6 Инициация проекта**

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта.

#### **4.1.7 Цели и результаты проекта**

Перед определением целей необходимо перечислить заинтересованные стороны проекта. Информация по заинтересованным сторонам представлена в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Заинтересованные стороны проекта

<b>Заинтересованные стороны проекта</b>	<b>Ожидание заинтересованных сторон</b>
Пользователь	Простота в использовании технологии обработки
Разработчик	Получение прибыли со своего продукта

Научный руководитель, студент	Выполненная выпускная квалификационная работа
-------------------------------	---

Цели и результат проекта представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Цели и результат проекта

<b>Цели проекта:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Изучить имеющиеся разработки в изучаемом направлении</li> <li>– Разработать установку для проведения серии экспериментов</li> <li>– Собрать установку</li> <li>– Провести серию экспериментов</li> <li>– Обработать и проанализировать полученные данные</li> <li>– Сделать выводы об эффективности обработки при созданных условиях в сравнении со стандартными условиями</li> </ul>
<b>Ожидаемые результаты проекта:</b>	Успешное проведение экспериментов и подтверждение собственных гипотез. Возможность применения технологии на производстве
<b>Критерии приемки результата проекта:</b>	Подтверждение гипотезы в ходе ряда экспериментов и перспективность дальнейшего исследования в этом направлении ввиду отличных от ранее имеющихся результатов
<b>Требования к результату проекта:</b>	<b>Требование:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Экспериментальная установка собрана и работает исправно</li> <li>• Проведены все необходимые эксперименты с соблюдением условий их проведения</li> </ul>

#### 4.1.8 Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта. Эту информацию представить в табличной форме (табл. 4.12).

Таблица 4.12 – Ограничения проекта

<b>Фактор</b>	<b>Ограничения</b>
1.2.3.1 Бюджет проекта	25000 рублей
1.2.3.1.1 Источник финансирования	НИТПУ
1.2.3.2 Сроки проекта	01.09.2021 – 31.05.2022
1.2.3.2.1 Фактическая дата утверждения плана управления проектом	15.10.2021
1.2.3.2.2 Плановая дата завершения проекта	31.05.2022

#### 4.2 Планирование управления научно-техническим проектом

##### 4.2.1 Иерархическая структура работ проекта

Группа процессов планирования состоит и процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

План управления научным проектом должен включать в себя следующие элементы:

- иерархическая структура работ проекта;
- контрольные события проекта;
- план проекта;
- бюджет научного исследования.

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта. На рисунке 1 представлена иерархическая структура ВКР.

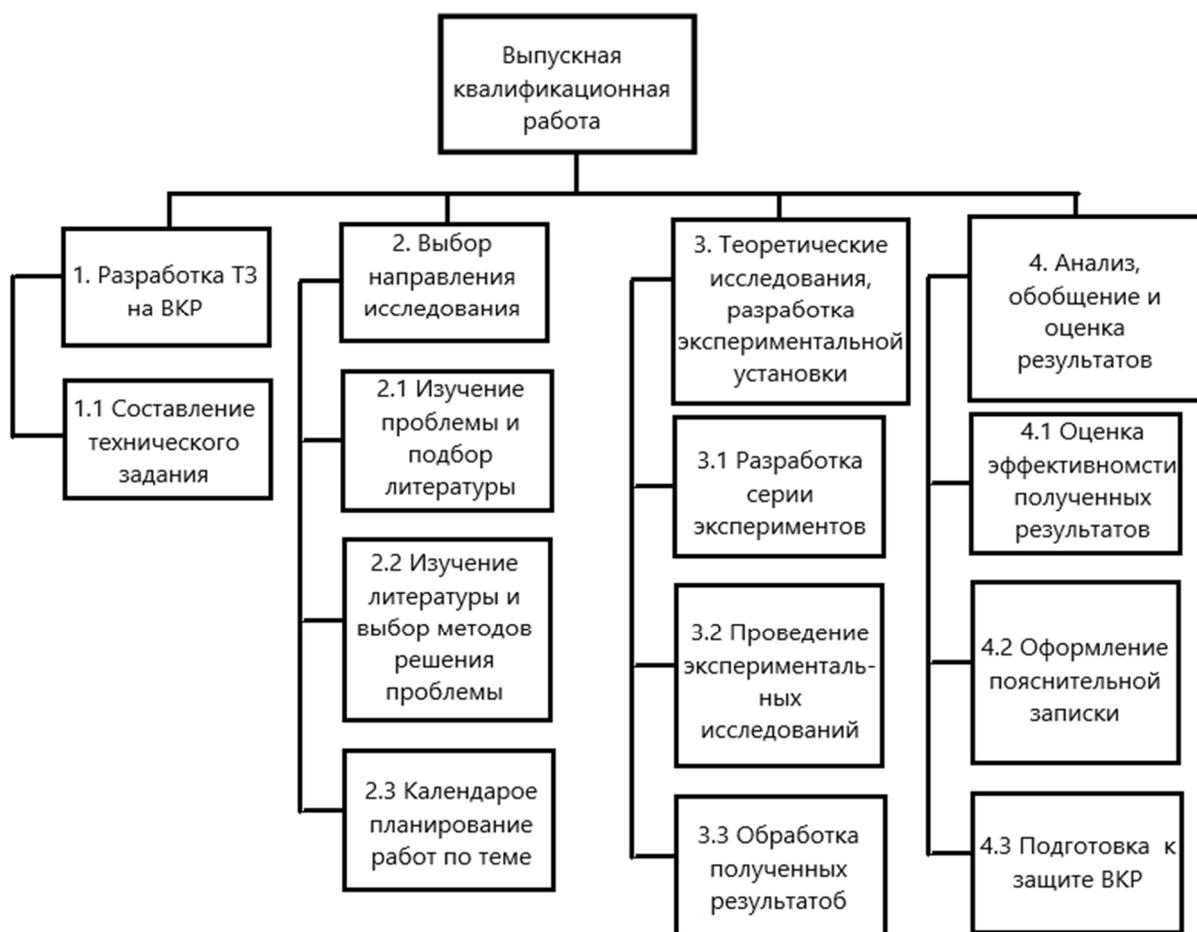


Рисунок 4.1 – Иерархическая структура по ВКР

#### 4.2.2 План проекта

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде табл. 4.13. с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 4.13 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№	Вид работ	Исп.	$T_{ki}$ , кал. дн.	Продолжительность работ													
				февр			март			апр			май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Исп.1	4	█													
2	Календарное планирование выполнения ВКР	Исп.1 Исп.2	4	█													
3	Обзор научной литературы	Исп.2	22		█	█	█										
4	Выбор методов исследования	Исп.2	5				█										
5	Планирование эксперимента	Исп.1 Исп.2	7				█	█									
6	Закупка образцов для эксперимента	Исп.2	8					█									
7	Проведение эксперимента	Исп.2	22						█	█	█						
8	Обработка полученных данных	Исп.2	18									█	█	█			
9	Оценка правильности полученных результатов	Исп.1 Исп.2	5												█		
10	Составление пояснительной записки	Исп.2	17													█	█

Примечание:

█ – Исп. 1 (научный руководитель), █ – Исп. 2 (инженер)

### 4.2.3 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в таблице (табл. 4.18).

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в табл. 4.14.

Таблица 4.14 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Единица измерения	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Алюминий	кг	0,1	106,4	10,6
Латунь	кг	0,1	426	42,6
Сталь 40Х	кг	0,1	68	6,8
Свинец	кг	0,1	150	15
Оловянно-свинцовый припой ПОС60	кг	0,1	1800	180
Защитные очки	шт	1	1800	1800
Бумага	уп шт	1	403	403
Пишущие принадлежности	шт	2	-	87
Услуги печати	-	-	920	920
Всего за материалы				3465
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				138,6
Итого по статье $C_m$				3603,6

## Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

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

При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15 % от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного научного проекта и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в виде амортизационных отчислений. Все расчеты по приобретению спецоборудования и оборудования, имеющегося в организации, но используемого для выполнения конкретной темы, сводятся в табл. 4.15.

Таблица 4.15 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во ед.	Срок полезного использования, лет	Время использования, мес.	$N_4, \%$	Цена оборудования, руб.	Амортизация
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Лазерная система «МиниМаркер 2»	1	7	0,39	14,3	1650000	7668
2	Форвакуумный насос	1	-	-	-	5600	-
3	Ноутбук Asus	1	3	0,39	33	39900	428
4	Механический индикатор перемещений	1	10	0,1	0,1	1407	1,17
<b>Итого:</b>						13697 руб.	

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

где  $n$  – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A \cdot И}{12} \cdot t,$$

где  $И$  – итоговая сумма, тыс. руб.;  $t$  – время использования, мес.

### **Основная заработная плата**

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда). Расчет основной заработной платы сводится в табл. 4.18.

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

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $Z_{осн}$ ).

Основная заработная плата  $Z_{осн}$  одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p,$$

где  $Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата, руб.;  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (таблица 4.13).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{51285 \cdot 10,4}{251} = 2125 \text{ руб.},$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

– при отпуске в 24 раб. дня –  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная рабочая неделя;

– при отпуске в 48 раб. дней –  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{33150 \cdot 11,2}{223} = 1664,9 \text{ руб.}$$

Таблица 4.16 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	52/14	104/14
– выходные дни		
– праздничные дни		
Потери рабочего времени	48	24
– отпуск		
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	223

Должностной оклад работника за месяц:

– для руководителя:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot (k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.}$$

– для инженера:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot (k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.},$$

где  $Z_{\text{б}}$  – базовый оклад, руб.;  $k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент, равен 0,3;  $k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2;  $k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 4.17 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИР	$Z_b$ , руб.	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб.дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2125	9	19125
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1664,9	103	171484,7
Итого:								190609,7

Таблица 4.18 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов		Трудоемко сть, чел.- дн.		Заработная плата, приходящая я на один чел.-дн., руб.		Всего заработная плата по тарифу (окладам), руб.	
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2
1	Составление и утверждение технического о задания, утверждение плана- графика	-	4	-	2125	-	8500	-
2	Календарное планирование выполнения ВКР		1	3	2125	1664,9	2125	4994,7
3	-	Обзор научной литературы	-	22	-	1664,9	-	36627,8
4	-	Выбор методов исследовани я	-	5	-	1664,9	-	8324,5
5	Планирование эксперимента		2	5	2125	1664,9	4250	8324,5
6	-	Закупка образцов	-	8	-	1664,9	-	13319,2

		для эксперимент а						
7	-	Проведение эксперимент а	-	22	-	1664,9	-	36627,8
8	-	Обработка полученных данных	-	18	-	1664,9	-	29968,2
9	Оценка правильности полученных результатов		2	3	2125	1664,9	4250	4994,7
10	-	Составление пояснительн ой записки	-	17	-	1664,9	-	28303,3
Итого:							190609,7 руб.	

*Примечание:* Исп.1 – руководитель, Исп.2 – инженер.

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

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 19125 = 2868,75 \text{ руб.}$$

– для инженера:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 171484,7 = 25722,71 \text{ руб.,}$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

Общая заработная плата составит:

– для руководителя:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} = 19125 + 2868,75 = 21993,75 \text{ руб.}$$

– для инженера:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} = 171484,7 + 25722,71 = 197207,41 \text{ руб.}$$

В таблице 4.19 приведен расчёт основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 4.19 – Заработная плата исполнителей ВКР, руб

Заработная плата	Руководитель	Магистр
Основная зарплата	19125	171484,7
Дополнительная зарплата	2868,75	25722,71
Зарплата исполнителя	21993,75	197207,41
Итого		219201,16

### Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

Для руководителя:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}}(Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,3 \cdot (19125 + 2868,75) = 6598,13 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}}(Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,3 \cdot (171484,7 + 25722,71) = 59162,22 \text{ руб.,}$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование).

Таблица 4.20 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Коэффициент отчислений во	Итого, руб.

			внебюджетные фонды	
Руководитель НИР	19125	2868,75	0,3	6598,13
Инженер	171484,7	25722,71		59162,22

### **Накладные расходы**

В эту статью относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70 - 90 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}})$$

$k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов. Величина коэффициента принимается равной 0,16.

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

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Таблица 4.21 – Бюджет затрат НИИ

	Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Накладные расходы	Отчисления на социальные нужды	Итого плановая себестоимость
1	3603,6	13697	190609,7	28591,46	35072,2	65760,35	<b>337334,31</b>

#### 4.2.4 Организационная структура проекта

В практике используется несколько базовых вариантов организационных структур: функциональная, проектная, матричная.

Для выбора наиболее подходящей организационной структуры можно использовать табл. 4.22.

Таблица 4.22 – Выбор организационной структуры научного проекта

Критерии выбора	Функциональная	Матричная	Проектная
Степень неопределенности условий реализации проекта	Низкая	Высокая	Высокая
Технология проекта	Стандартная	Сложная	Новая
Сложность проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимозависимость между отдельными частями проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Критичность фактора времени (обязательства по срокам завершения работ)	Низкая	Средняя	Высокая

<b>Взаимосвязь и взаимозависимость проекта от организаций более высокого уровня</b>	Высокая	Средняя	Низкая
---	---------	---------	--------

Наиболее подходящей является проектная структура, так как технология проекта является новой, высокая сложность проекта за счет создания необходимых условий и имеются ограниченные сроки реализации.

#### 4.2.5 План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта. План управления коммуникациями приведен в табл. 4.23.

Таблица 4.23 – План управления коммуникациями

<b>№ п/п</b>	<b>Какая информация передается</b>	<b>Кто передает информацию</b>	<b>Кому передается информация</b>	<b>Когда передает информацию</b>
1.	Статус проекта	Руководитель проекта	Ответственное лицо по направлению	Ежеквартально (первая декада квартала)
2.	Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Исполнитель проекта	Участникам проекта	Еженедельно (пятница)
3.	Документы и информация по проекту	Ответственное лицо по направлению	Руководителю проекта	Не позже сроков графиков и к. точек
4.	О выполнении контрольной точки	Исполнитель проекта	Руководителю проекта	Не позже дня контрольного события по плану управления

#### 4.2.6 Реестр рисков проекта

Произведем оценку рисков. Определение рисков является одним из важнейших моментов при создании проекта. Учет рисков поможет при реализации проекта избежать опасных факторов. Далее производится оценка важности рисков.

Таблица 4.24 – Социальные риски

№	Риски	P <sub>i</sub>	b <sub>i</sub>	w <sub>i</sub>	P <sub>i</sub> *w <sub>i</sub>
1	Низкая квалификация персонала	75	10	0,4	30
2	Непросвещенность компаний в области светодиодных осветительных приборов	75	6	0,2	15
3	Бюрократические проволочки на стадии регистрации	50	5	0,05	2,5
4	Несоблюдение техники безопасности	100	7	0,2	20
5	Увеличение нагрузки на персонал	25	1	0,1	2,5
6	Отсутствие корпоративных стандартов	25	1	0,05	1,25
	Сумма		30	1	71,25

Таблица 4.25 – Экономические риски

№	Риски	P <sub>i</sub>	b <sub>i</sub>	w <sub>i</sub>	P <sub>i</sub> *w <sub>i</sub>
1	Инфляция	100	6	0,1	10
2	Экономический кризис	50	3	0,1	5
3	Недобросовестность поставщиков	100	8	0,1	10
4	Непредвиденные расходы в плане работ	100	7	0,15	15
5	Снижение уровня спроса на продукцию	75	8	0,2	15
6	Сложность выхода на мировой рынок вследствие монополизированность рынка	75	7	0,15	11,25
7	Колебания рыночной конъюнктуры	25	4	0,05	1,25
8	Отсутствие в числе сотрудников экономистов	25	5	0,05	1,25

9	Низкие объемы сбыта	75	6	0,2	7,5
	Сумма		54	1	76,25

Таблица 4.26 – Политические риски

№	Риски	P <sub>i</sub>	b <sub>i</sub>	w <sub>i</sub>	P <sub>i</sub> *w <sub>i</sub>
1	Снижение приоритета Правительства РФ в области промышленных технологий	50	6	0,4	20
2	Смена власти	0	1	0,1	0
3	Угроза национализации	0	1	0,1	0
4	Отсутствие поддержки со стороны чиновников	50	5	0,4	20
	Сумма		13	1	40

Таблица 4.27 – Технологические риски

№	Риски	P <sub>i</sub>	b <sub>i</sub>	w <sub>i</sub>	P <sub>i</sub> *w <sub>i</sub>
1	Возможность поломки оборудования	100	8	0,3	30
2	Низкое качество поставленного оборудования	75	8	0,2	15
3	Неправильная сборка оборудования	100	7	0,2	20
4	Опасность для работающего персонала и аппаратуры	75	8	0,3	22,5
	Сумма		31	1	87,5

Таблица 4.28 – Научно-технические риски

№	Риски	P <sub>i</sub>	b <sub>i</sub>	w <sub>i</sub>	P <sub>i</sub> *w <sub>i</sub>
1	развитие конкурентных технологий	75	8	0,2	15
2	создание новых методов обработки	75	8	0,2	15
3	риск невозможности усовершенствования технологии	50	7	0,1	5
4	отсутствие результата в установленные сроки	75	7	0,2	15
5	получение отрицательного результата при внедрении в производство	75	10	0,2	15
6	несвоевременное патентование	25	5	0,1	2,5

Сумма		45	1	67,5
-------	--	----	---	------

Таблица 4.29 – Общие риски

№ п/п	Риски	$P_i$	$b_i$	$b_i * w_i$
1	Социальные	58,3	30	71,25
2	Экономические	69,4	54	76,25
3	Политические	50	13	40
4	Технологические	87,5	31	87,5
5	Научно-технические	62,5	45	67,5
Итого			34,6	68,5

Расчет общих рисков дает общую оценку в 68,5, т.е. проект имеет право на жизнь, хотя и имеет достаточно высокие риски.

Для того чтобы избежать риски или минимизировать их воздействие на проект необходимо проводить мероприятия по борьбе с рисками. Рекомендуемые мероприятия приведены ниже:

1. не скупиться на зарплату высококвалифицированному персоналу, затратить время на поиск персонала;
2. писать статьи в научно-популярных изданиях, проводить работу с инвесторами;
3. организация режима труда-отдыха, премирование добросовестных работников;
4. закладывание в бюджет дополнительных потерь финансовых средств от инфляции;
5. прогнозирование экономической ситуации;
6. поиск добросовестных и проверенных поставщиков;
7. проведение рекламной кампании;
8. закладка в бюджет и план работ дополнительных расходов; прогнозирование экономической ситуации;
9. поиск добросовестных и проверенных поставщиков;
10. закладка в бюджет и план работ дополнительных расходов;
11. проведение рекламной кампании;

12. проведение рекламной кампании за рубежом, поиск опытных экономистов;
13. заказ качественного оборудования известных фирм-производителей, качественный монтаж и эксплуатация оборудования;
14. качественный монтаж и эксплуатация оборудования;
15. проведение мероприятий по ТБ.
16. искать и рассматривать всевозможные пути оптимизации;
17. премирование и штрафные санкции к ответственным за выполнение работ по плану, отслеживание времени начала и окончания работ, четкого графика;
18. согласование и контакт с возможными покупателями продукта.

#### **4.3 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования**

##### **4.3.1 Оценка абсолютной эффективности исследования**

В основе проектного подхода к инвестиционной деятельности предприятия лежит принцип денежных потоков (cash flow). Особенностью является его прогнозный и долгосрочный характер, поэтому в применяемом подходе к анализу учитываются фактор времени и фактор риска. Для оценки общей экономической эффективности инноваций в качестве основных показателей рекомендуются:

- чистый доход;
- чистый дисконтированный доход;
- внутренняя норма доходности;
- потребность в дополнительном финансировании;
- срок окупаемости;
- индексы доходности затрат и инвестиций и др.

Прямые материальные затраты обусловлены закупкой необходимых компонентов и материалов для проведения экспериментов. Для реализации

проекта на покупку материалов потребуется 17300,6 руб. Общее капиталовложение составит 337334,31.

Таблица 4.30 – План денежных потоков

№	Показатель, млн.руб	Номер шага (периода) расчета (t)					
		0	1	2	3	4	5
<b>Операционная деятельность</b>							
1	Выручка без НДС	0	910	1100	1250	1300	1550
2	Полные текущие издержки, в том числе:	0	-906,0	-437,0	-467,0	-448	-468
3	Прямые материальные затраты	0	-510,0	-41,00	-41,00	-42,00	-42,00
4	ФОТ основных рабочих, включая взносы во внебюджетные фонды	0	-254,0	-254,0	-254,0	-254,0	-254,0
5	Силовая энергия	0	-10	-10	-10	-10	-10
6	Общепроизводственные расходы	0	-27,0	-27,0	-27,0	-27,0	-27,0
7	Общехозяйственные расходы	0	-15	-15	-15	-15	-15
8	Коммерческие расходы	0	-80	-80	-110	-100	-110
9	Прочие расходы	0	-10	-10	-10	-10	-10
10	Денежный поток от производственной (операционной) деятельности (п.1-п.2)	0	4	663	783	852	1082
<b>Инвестиционная деятельность</b>							
11	Поступление инвестиций	0	0	0	0	0	0

12	Капиталовложения, обслуживание инвестиций	- 337,3 3	0	0	0	0	0
13	Сальдо от инвестиционной деятельности (п.11+п.12)	- 337,3 3	0	0	0	0	0
14	Сальдо суммарного потока (п.10+п.13)	- 337,3 3	4	663	783	852	1082
15	Сальдо накопленного потока	- 337,3 3	- 333,3 3	329,6 7	1112, 67	1964, 67	3046, 67
16	Коэффициент дисконтирования при ставке дохода 10%	1	0,909	0,826	0,751	0,683	0,621
17	Дисконтированное сальдо суммарного потока (п.14*п.16)	- 337,3 3	3,636	547,6 38	588,0 3	581,9 16	671,9 2
18	Дисконтированные инвестиции (п.12*п.16)	- 337,3 3	0	0	0	0	0

Определим срок окупаемости.

$$t = \frac{-C_{н2}}{C_{сум3}} = \frac{333,33}{663} = 0,5 \text{ периода,}$$

где  $C_{н2}$  - сальдо накопленного потока 2 периода,  $C_{сум3}$  - сальдо суммарного потока 3 периода.

Таким образом, окупаемость данного производства составит 3,5 года при отсчете от начала нулевого периода или 2,5 года если же отсчитывать его от начала операционной деятельности (конец нулевого периода).

### 4.3.2 Оценка сравнительной эффективности исследования

1. *Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования*

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^P = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}},$$

где  $I_{\Phi}^P$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\max}$  – максимальная стоимость исполнения.

В качестве аналогов метода обработки, рассматриваемого в рамках текущего НИР рассмотрен:

- 1) механическая резка (350 т.р.);
- 2) фрезерование (367 т.р.);
- 3). шлифование (310 т.р.).

$$I_{\Phi T}^P = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}} = \frac{337334}{367000} = 0,9$$

$$I_{\Phi 1}^P = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}} = \frac{350000}{367000} = 0,95$$

$$I_{\Phi 2}^P = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}} = \frac{367000}{367000} = 1$$

$$I_{\Phi 1}^P = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}} = \frac{310000}{367000} = 0,84$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

2. *Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования*

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  – весовой коэффициент проекта;

$b_i$  – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик метода, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 4.31.

Таблица 4.31 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения НИР

Критерии	Весовой коэффициент	текущий метод	аналог 1	аналог 2	аналог 3
Скорость обработки материалов	0,13	5	3	2	3
Минимизация отходов	0,13	5	1	1	1
Качество поверхности после обработки	0,13	5	3	2	3
Толщина обрабатываемой детали	0,08	2	5	5	5
Производительность	0,12	5	3	2	4
Диапазон типов материалов, которые	0,1	5	4	4	4

могут быть обработаны данным методом					
Энергоэффективность	0,12	4	2	2	2
Возможность обработки легкодеформируемых и нежестких заготовок или деталей	0,1	5	1	1	1
Раскрой материалов по сложному криволинейному контуру	0,09	5	2	2	3
Итого:	1	41	24	21	26

Расчет интегрального показателя:

$$I_{рТ} = 0,13 \cdot 5 + 0,13 \cdot 5 + 0,13 \cdot 5 + 0,08 \cdot 2 + 0,12 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,12 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,09 \cdot 5 = 4,64$$

$$I_{р1} = 0,13 \cdot 3 + 0,13 \cdot 1 + 0,13 \cdot 3 + 0,08 \cdot 5 + 0,12 \cdot 3 + 0,1 \cdot 4 + 0,12 \cdot 2 + 0,1 \cdot 1 + 0,09 \cdot 2 = 2,59$$

$$I_{р2} = 0,13 \cdot 2 + 0,13 \cdot 1 + 0,13 \cdot 2 + 0,08 \cdot 5 + 0,12 \cdot 2 + 0,1 \cdot 4 + 0,12 \cdot 2 + 0,1 \cdot 1 + 0,09 \cdot 2 = 2,21$$

$$I_{р3} = 0,13 \cdot 3 + 0,13 \cdot 1 + 0,13 \cdot 3 + 0,08 \cdot 5 + 0,12 \cdot 3 + 0,1 \cdot 4 + 0,12 \cdot 2 + 0,1 \cdot 1 + 0,09 \cdot 2 = 2,8$$

4. Интегральный показатель эффективности разработки

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p}, \quad I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_\phi^a}$$

$$I_{финр}^p = \frac{I_T^p}{I_\phi^p} = \frac{4,64}{0,9} = 5,16$$

$$I_{финр}^{a1} = \frac{I_T^{a1}}{I_\phi^{a1}} = \frac{2,59}{0,95} = 2,73$$

$$I_{\text{финр}}^{a2} = \frac{I_{\text{Т}}^{a2}}{I_{\text{Ф}}^{a2}} = \frac{2,21}{1} = 2,21$$

$$I_{\text{финр}}^{a3} = \frac{I_{\text{Т}}^{a3}}{I_{\text{Ф}}^{a3}} = \frac{2,8}{0,84} = 3,33$$

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a}$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср1}} = \frac{5,16}{2,73} = 1,89$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср2}} = \frac{5,16}{2,21} = 2,33$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср3}} = \frac{5,16}{3,33} = 1,55$$

Таблица 4.32 – Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

№ п/п	Показатели	Текущий метод	Аналог 1	Аналог 2	Аналог 3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,9	0,95	1	0,84
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,64	2,59	2,21	2,8
3	Интегральный показатель эффективности	5,16	2,73	2,21	3,33
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,89/2,33/1,55	0,53	0,43	0,65

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее ресурсоэффективным является вариант 1 (текущий метод). Однако он немного уступает аналогу с точки зрения финансовой эффективности. Но несмотря на это наш метод является наиболее эффективным по сравнению с конкурентами, так как достоинства текущего метода оправдывают чуть более высокие финансовые затраты.

### Выводы по разделу

По итогу выполнения данного раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими. Были выявлены сильные и слабые стороны метода, рассмотренного в рамках данной НИР.

2. В ходе планирования для руководителя и инженера был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Определено следующее: общее количество дней для выполнения работ составляет 107 дней; общее количество дней, в течение которых работал инженер, составляет 103 дней; общее количество дней, в течение которых работал руководитель, составляет 9 дней;

3. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 337334,31 руб;

4. Результат оценки эффективности ИР показывает следующие выводы:

1) значение интегрального финансового показателя метода НИР составляет 0,9, что является показателем того, что НИР является не самым финансово выгодным по сравнению с аналогами;

2) значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,64, по сравнению с 2,59; 2,21; 2,8;

3) значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 5,16 и является наиболее высоким, что означает, что метод обработки металлических материалов, рассматриваемый в НИР, является наиболее эффективным даже несмотря на чуть более высокие финансовые затраты. Они компенсируются рядом достоинств текущего метода.