

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 12.03.02 «Оптотехника»
 Отделение материаловедения

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Изучение режимов глубокой лазерной гравировки металлических материалов

УДК 739.7::537.86:530.145.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В61	Степина Анастасия Игоревна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Зыков И.Ю.	К.ф.-М.Н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Директор ООО «Квант»	Ахметшин Р. Г.	-		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кашук И.В.	К.Т.Н, доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина М.С.	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Степанов С.А	К.ф.-М.Н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять глубокие естественнонаучные, математические, гуманитарные, общепрофессиональные знания в области оплотехники
P2	Воспринимать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области световой, оптической и лазерной техники, оптического и светотехнического материаловедения и оптических и светотехнических технологий
P3	Применять полученные знания для решения задач, возникающих при эксплуатации новой техники и технологий оплотехники
P4	Владеть методами и компьютерными системами проектирования и исследования световой, оптической и лазерной техники, оптических и светотехнических материалов и технологий
P5	Владеть методами проведения фотометрических и оптических измерений и исследований, включая применение готовых методик, технических средств и обработку полученных результатов
P6	Владеть общими правилами и методами наладки, настройки и эксплуатации оптической, световой и лазерной техники для решения различных задач
<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Проявлять творческий подход при решении конкретных научных, технологических и опытно-конструкторских задач в области оплотехники
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной деятельности
P9	Уметь эффективно работать индивидуально и в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации
P10	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научной, педагогической и производственной деятельности
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 12.03.02 «Оптотехника»
 Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Степанов С.А.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврская работа

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4В61	Степина Анастасия Игоревна

Тема работы:

Изучение режимов глубокой лазерной гравировки металлических материалов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</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>Литература по теме ВКР. Объект исследования – процесс взаимодействия лазерного излучения с металлическими материалами. Глубокая лазерная гравировка различных металлов.</p>
---	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><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>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор литературы: традиционная обработка металлов и сплавов лазером: резка, сварка, сверление отверстий при длинноимпульсном и непрерывном воздействии; лазерная гравировка и маркировка: поверхностная обработка, абляция, незначительное заглубление; глубокая лазерная гравировка, заглубляющийся источник тепла; 2. Тепловой расчет при воздействии лазерного импульса на металл; 3. Измерение скорости обработки на разных металлах и сплавах, исследование влияние теплопроводности и температуропроводности на скорость обработки. 4. Анализ полученных результатов.
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Графики положения различных материалов в координатах скорость заглубления – коэффициент теплопроводности и скорость заглубления – коэффициент температуропроводности.</p>

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Доцент ОСГН Кащук И.В.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Ассистент Черемискина М.С.</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p> </p>	

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

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

<p>Группа</p>	<p>ФИО</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>4В61</p>	<p>Степина Анастасия Игоревна</p>	<p> </p>	<p> </p>

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4В61	Степина Анастасия Игоревна

Школа	Инженерная школа новых производственных технологий	Отделение школы (НОЦ)	Отделение материаловедения
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	12.03.02 «Оптотехника»

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды от ФОТ – 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала научно-исследовательской работы	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения НИР	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования
3. Составление бюджета НИР	Расчет бюджета затрат на исследование
4. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности НИР и потенциальных рисков	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценка конкурентоспособности НИР
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИР
5. Основные показатели эффективности НИР

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кащук Ирина Вадимовна	к.т.н, доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В61	Степина Анастасия Игоревна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4В61	Степина Анастасия Игоревна

Школа	Инженерная школа новых производственных технологий	Отделение (НОЦ)	Отделение материаловедения
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	12.03.02 «Оптотехника»

Тема ВКР:

Изучение режимов глубокой лазерной гравировки металлических материалов	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: процесс взаимодействия лазерного излучения с металлическими материалами Область применения: лазерная обработка металлических материалов
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования; 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; СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы; ГОСТ 31581-2012 Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы: -загрязнение воздушной среды в зоне дыхания; - ультрафиолетовое, видимое и инфракрасное излучения от источников накачки, плазменного факела и материалов мишени; -лазерное излучение. Опасные факторы: -электрический ток.
3. Экологическая безопасность:	Атмосфера: выделение вредных аэрозолей, газов и паров. Литосфера: отходы. Гидросфера: не оказывает влияния.

4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС: пожар, взрыв, разрушение фасада здания. Наиболее типичная ЧС: пожар.
---	---

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина Мария Сергеевна	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В61	Степина Анастасия Игоревна		

Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 101 с., 27 рис., 42 табл. и 44 источников.

Ключевые слова: глубокая лазерная гравировка, алюминий, бронза, сплав ВК-8, сталь, скорость обработки (скорость заглабления), коэффициент теплопроводности, коэффициент температуропроводности, заглабляющийся источник тепла, тепловой баланс.

Объектом исследования является процесс взаимодействия лазерного излучения с металлическими материалами.

Цель работы – изучение режимов глубокой лазерной гравировки металлических материалов, установление закономерностей и зависимостей скоростей обработки различных металлов от их теплопроводности и оценка теплового баланса при воздействии лазерного импульса.

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 скорости обработки металлических материалов от их теплопроводности, и проведен анализ теплового баланса при воздействии лазерного импульса, что позволяет разобраться в сущности процесса лазерной обработки 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;

ЗТВ – зона термического влияния;

ЗП – зона плавления;

АЧТ – абсолютно-черное тело;

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

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

грат: Затвердевший металл и оксид металла, приставший к нижней части поверхности.

шлак: Сплав окислов переменного состава (расплав, после затвердевания – камневидное или стекловидное вещество), обычно покрывающий поверхность жидкого металла при плавильных процессах.

абляция: Фазовый переход из твердого состояния в пар.

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ EN 1011-6-2017 Сварка. Рекомендации по сварке металлических материалов. Часть 6. Лазерная сварка.
2. ГОСТ 3882 – 74 Сплавы твердые спеченные. Марки.

Оглавление

Введение.....	11
1 Литературный обзор	14
1.1 Лазерный нагрев материала	16
1.2 Традиционная обработка материалов лазерным излучением	18
1.2.1 Лазерная резка	18
1.2.2 Лазерная сварка	24
1.2.3 Лазерное сверление отверстий	30
1.3 Лазерная маркировка и гравировка.....	34
1.3.1 Глубокая лазерная гравировка.....	39
2 Объекты и методы экспериментального исследования	41
2.1 Исследуемые образцы Al, бронзы, сплава ВК-8 и сталей различных марок	41
2.2 Лазерная система.....	45
2.3 Методы экспериментального исследования	47
3 Экспериментальное исследование взаимодействия лазерного излучения с металлами при глубокой лазерной гравировке	49
3.1 Тепловой расчет	49
3.2 Скорость лазерной обработки металлических материалов	52
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	60
5 Социальная ответственность	84
Заключение	96
Список использованных источников	97

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, быстродействия 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 их теплопроводности и оценка теплового баланса при воздействии лазерного импульса.

Для достижения этих целей в дипломной работе поставлены следующие задачи:

- изучить теоретические основы глубокой лазерной гравировки и принцип действия волоконного лазера на примере лазерного маркера МиниМакркер 2;
- провести ряд экспериментов с целью нахождения скорости обработки некоторых металлов;
- изучить данные по скоростям лазерной обработки сталей различных марок;
- проанализировать зависимость скорости лазерной обработки металлических материалов от их теплопроводности;
- провести анализ теплового баланса;
- сформулировать основные выводы по работе.

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

Предметом исследования выступила скорость обработки (скорость заглабления) материалов.

Новизна исследования заключается в том, что в дипломной работе достаточно подробно проанализирована зависимость скорости обработки металлических материалов от их теплопроводности, и проведен анализ теплового баланса при воздействии лазерного импульса, что позволяет разобраться в сущности процесса лазерной обработки 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 лазеров 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 традиционные способы обработки материалов лазерным излучением, такие как резка, сварка и сверление отверстий, а также лазерная маркировка и гравировка, в том числе глубокая гравировка, и основные закономерности данных методов. Представлены результаты современных научных исследований в области лазерной обработки (ЛО) металлических материалов.

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].

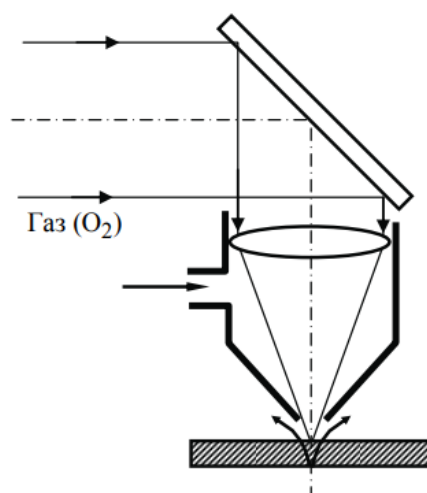


Рисунок 1.1 – Оптическая схема резака для газолазерной резки [2]

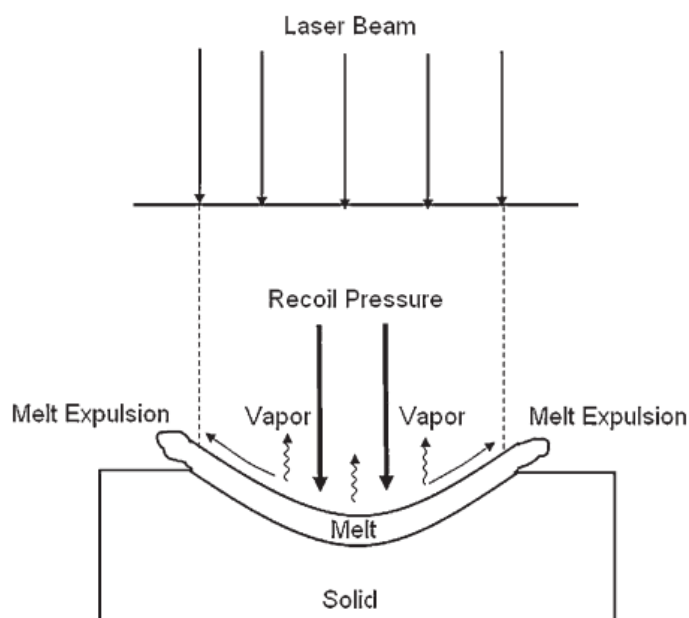


Рисунок 1.2 – Схема процессов поверхностного испарения и выталкивания расплава при удалении материала при взаимодействии лазерного излучения с материалом [1]

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.

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].

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_2 -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_2 -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).

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/см² 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/см², и времени воздействия $10^{-9} - 10^{-6}$ с [7].

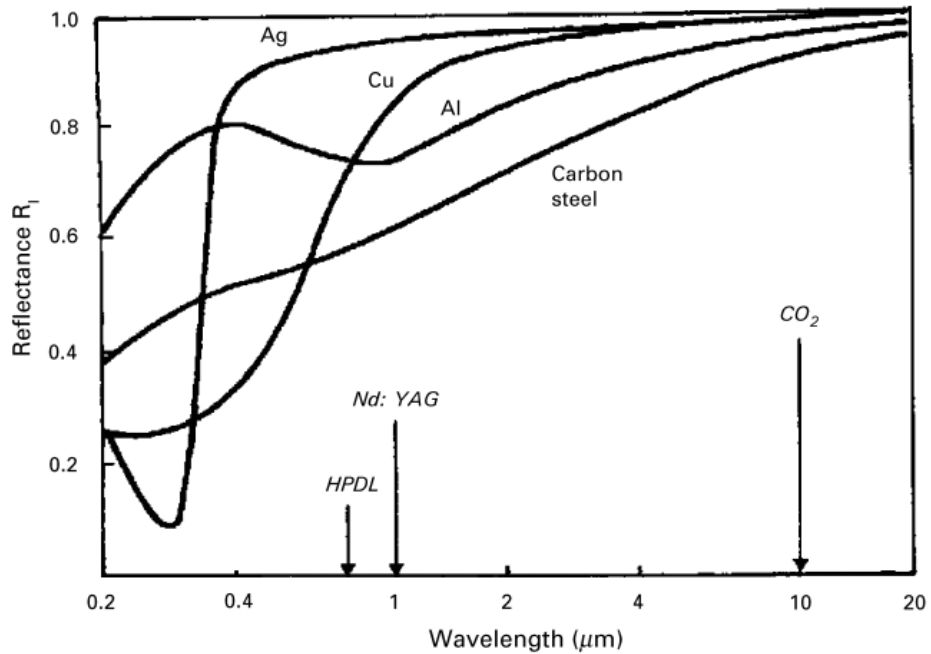


Рисунок 1.3 – Спектр отражения различных полированных металлических поверхностей: по горизонтали отложены значения длин волн (микрометры) для различных типов лазеров, по вертикали – коэффициент отражения [6]

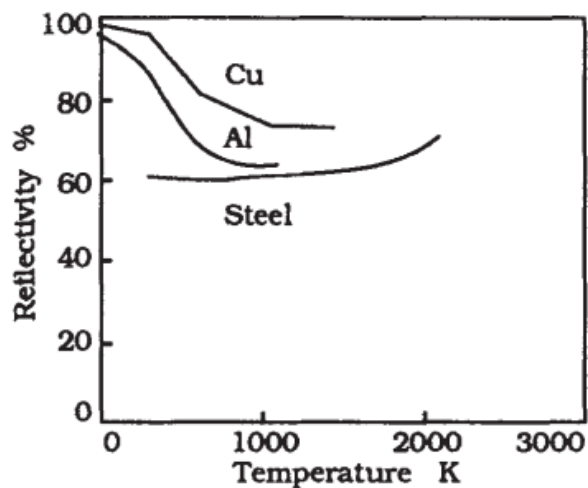


Рисунок 1.4 – Изменение отражательной способности с температурой для излучения 1,06 мкм [1]

CO₂ –, 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].

1.2 Традиционная обработка материалов лазерным излучением

1.2.1 Лазерная резка

Лазерным разделением (лазерной резкой) называется процесс достаточно быстрого локального нагрева, плавления и испарения материалов остросфокусированным лазерным излучением. Использование высокой плотности мощности излучения позволило существенно сократить время нагрева, плавления и испарения материала. При этом обеспечиваются скорости обработки, сравнимые со скоростью протекания физических процессов в объекте облучения. Участки материала, расположенные непосредственно рядом с зоной воздействия излучения и испытывающие его термическое влияние, составляют несколько долей миллиметра. Такая небольшая величина обусловлена высокими скоростями обработки и большой степенью локальности источника нагрева [5]. В отличие от других способов резки, таких как механическая, гидроабразивная и т.д., лазерная резка позволяет обрабатывать обширный круг материалов независимо от их прочности, в том числе это и легкодеформируемые материалы, так как отсутствует механическое воздействие (исключается деформация материала), получать узкие разрезы с минимальной зоной термического влияния, автоматизировать процесс [5], а также есть возможность раскроя материала по сложному контуру.

Лазерная резка может осуществляться посредством испарения материала в зоне реза (сублимационная резка) или плавления металла (лазерная резка плавлением). Расплавленный металл может удаляться струей инертного газа, такого как аргон или азот, или при помощи кислорода (газокислородная резка). Последняя отличается тем, что при таком способе подвод энергии к зоне

взаимодействия лазерного излучения и материала увеличивается в несколько раз, что позволяет резать листы металлов с большой толщиной и иметь высокую скорость обработки [8].

На глубину, ширину и качество реза могут влиять различные параметры как самого лазера, так и материала. В серии работ [9-11] изучено влияние различных параметров на процесс резки.

В работе [9] рассмотрено влияние мощности лазера и скорости резания на глубину зоны термического влияния и глубину зоны плавления. Лазерная резка проводилась на низкоуглеродистой стали толщиной 8 мм с использованием CO₂-лазера. На рисунках 1.5 и 1.6 по горизонтали отложены значения скорости резания в миллиметрах в минуту и диаметра лазерного пучка в миллиметрах соответственно; по вертикали – глубина ЗТВ в микрометрах; мощность указана в киловаттах. Авторы [9] установили, что глубина ЗТВ увеличивается с увеличением мощности лазера и уменьшается с увеличением скорости резания (рис.1.5: D – диаметр пучка). Изменение диаметра лазерного пучка оказывает незначительное влияние на глубину ЗТВ (рис.1.6).

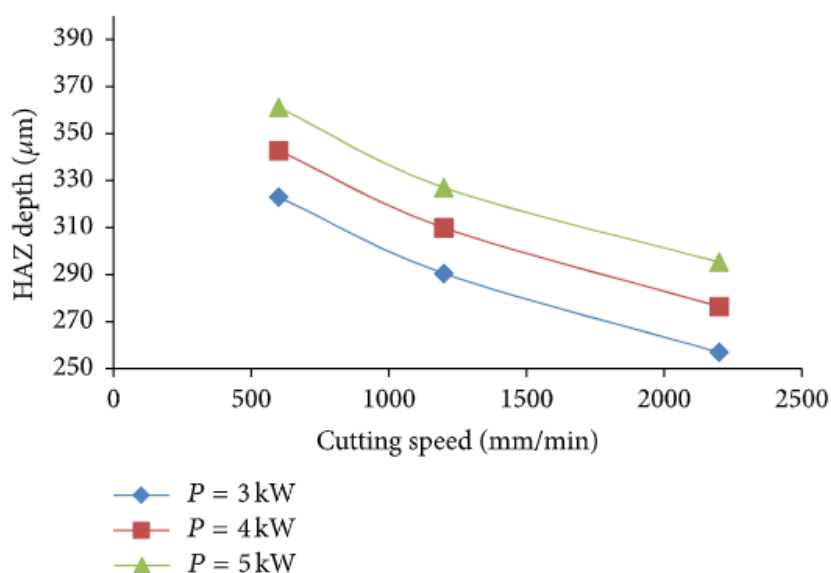


Рисунок 1.5 – Влияние мощности лазера и скорости резания на глубину ЗТВ (D = 1 мм) [9]

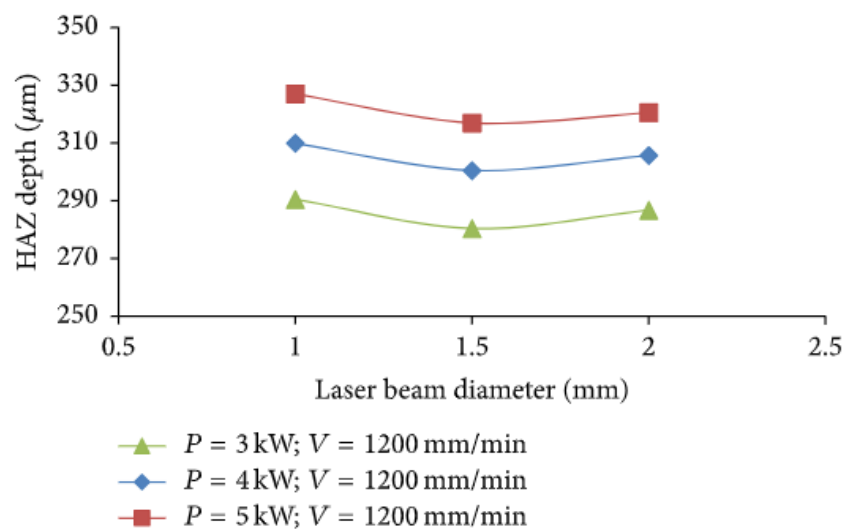


Рисунок 1.6 – Влияние диаметра лазерного пучка на глубину ЗТВ [9]

Глубина ЗП уменьшается с увеличением скорости резания и увеличивается с увеличением мощности лазера и диаметра лазерного луча. Увеличение мощности лазера приводит к увеличению температуры поверхности резания, что приводит к увеличению зоны расплавления. При быстрой скорости резания распространение тепла в образце происходит за более короткий промежуток времени. В этом случае происходит минимизация повреждения поверхности реза и, следовательно, получается термически более мелкая ЗП [9].

Влияние толщины заготовки и частоты лазерного излучения (частота повторения лазерных импульсов) на качество резки (размер реза и грата на кромке реза) нержавеющей стали излучением CO₂-лазера рассмотрено в работе [10]. При увеличении толщины заготовки снижается качество резки за счет увеличения бокового выгорания, увеличивается ширина реза. С увеличением толщины заготовки от 1 до 2 мм наблюдается увеличение высоты грата на кромке реза. При увеличении толщины с 3 до 4 мм наблюдается обратное. В этом случае высота грата уменьшается из-за того, что на нижнюю часть обрабатываемой лазером заготовки с большей толщиной передается меньшее количество энергии. Увеличение толщины также приводит к увеличению ЗТВ. Это объясняется большим потреблением энергии для более толстых заготовок

при лазерной резке. Частота лазерного импульса оказывает заметное влияние на ширину реза и зависит от толщины обрабатываемой заготовки.

Немаловажным параметром при лазерной резке является фокусное расстояние. Исследователи [11] подвергали облучению алюминий-медный сплав 2024-T3 при помощи CO₂ –лазера. В качестве вспомогательного газа использовались аргон, азот и сжатый воздух при непрерывном режиме работы лазера. На рисунке 1.7 по горизонтали отложены значения положения фокуса в миллиметрах (0 соответствует поверхности заготовки), по вертикали – значения максимальной скорости резания в миллиметрах в минуту (рис.1.7(a)) и высоты грата в миллиметрах (рис.1.7(b)). Скорость резания увеличивается при фокусировке лазерного луча непосредственно на поверхность заготовки или немного под нее (рис.1.7(a)). Изменение положения фокуса также оказывает влияние на высоту грата на кромке реза ввиду того, что изменяется распределения энергии на фронте резания. При расположении фокального пятна непосредственно на поверхности заготовки или немного под ней создается минимальный уровень грата (рис.1.7(b)).

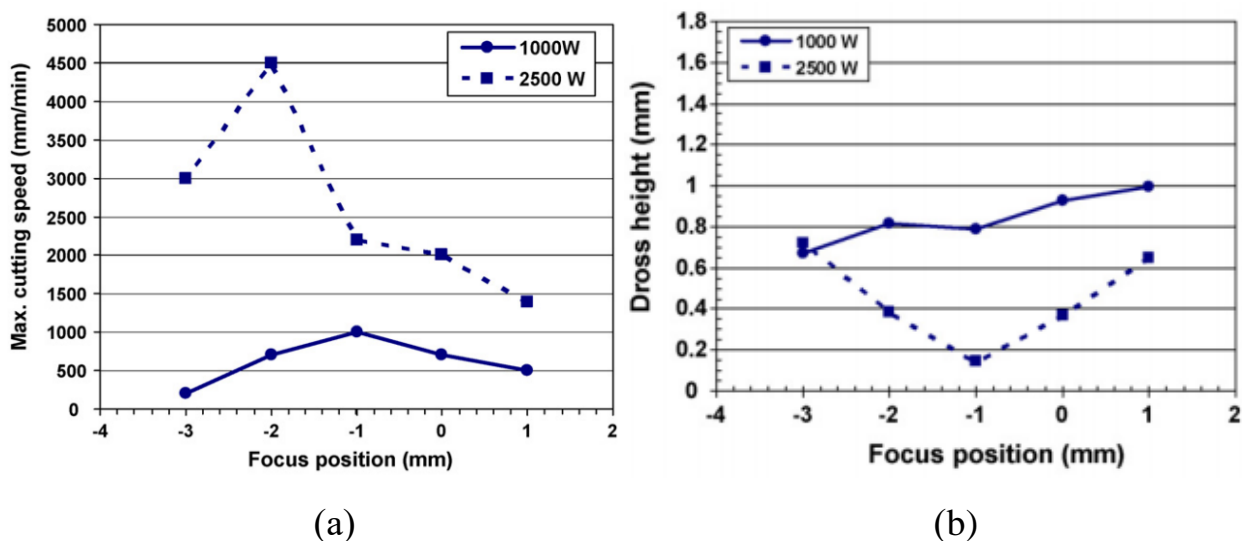


Рисунок 1.7 – Влияние положения фокуса на максимальную скорость резания (a) и высоту грата (b) для двух уровней мощности лазера 1000 и 2500 Вт при непрерывном режиме работы [11]

На качество резки также оказывает влияние струя вспомогательного газа, которая удаляет расплав из зоны резки. Например, на максимальную скорость

резания оказывают влияние такие параметры, как давление газа, диаметр выходного сопла и расстояние до него [11]. На рисунке 1.8 (a), (b) и (c) 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.1.8(a)), давлении газа 2, 5, 10 бар (рис.1.8(b)) и 4 и 10 бар (рис.1.8(c)).

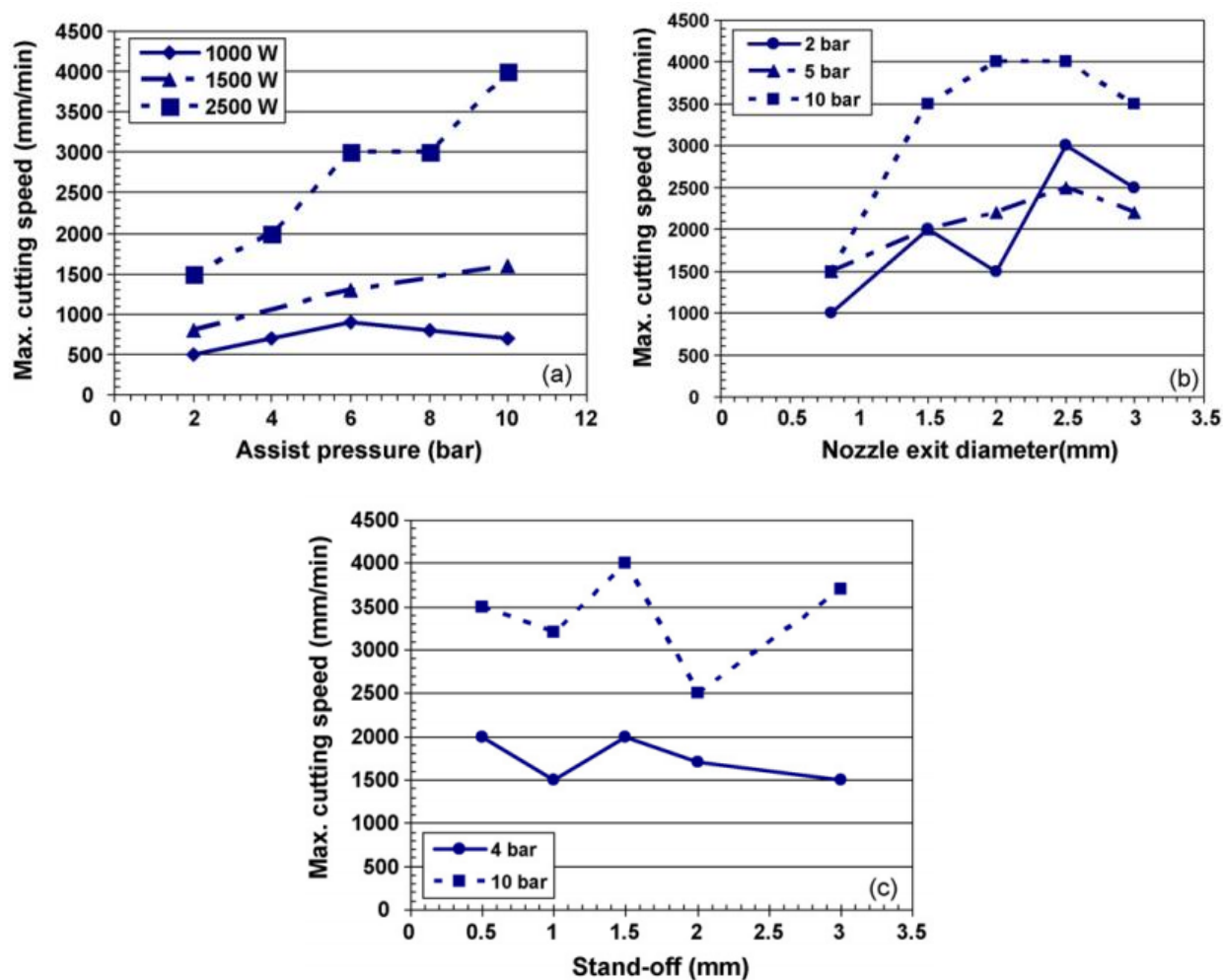


Рисунок 1.8 – Влияние параметров вспомогательного газа: (a) давление, (b) диаметр выходного сопла и (c) расстояние до сопла, на максимальную скорость резания [11]

Увеличение максимальной скорости резания наблюдается при увеличении давления вспомогательного газа и также зависит от мощности лазера (рис.1.8(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.1.8(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.1.8(c)) [11].

Характеристики материалов и содержание легирующих элементов в них оказывают существенное влияние на качество резки. Так, например, в работе [12] исследовано влияние содержания серы в стали на кислородно-лазерную резку с использованием CO₂-лазера. На рисунке 1.9 показаны рабочие окна для двух типов стали W.-nr. 1.2311 и W.-nr. 1.2312 с содержанием серы 0,005% и 0,060% соответственно: по горизонтали отложены значения давления газа (бар), по вертикали – мощности (ватт); × - плохое качество реза (грат, дефекты горения, неполноценная резка), ✖ - окисленный шлак, ● - хорошее качество реза, ○ - рабочее окно.

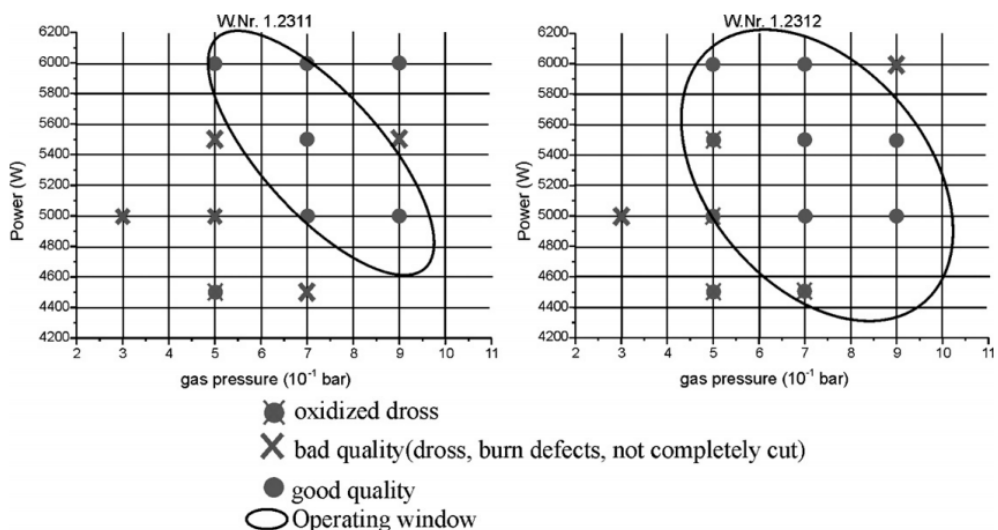


Рисунок 1.9 – Рабочее окно для двух типов стали [12]

Ученые [12] обнаружили, что у стали с большим содержанием серы рабочее окно больше. Это означает, что процесс резки является более стабильным для этой стали (окисленный шлак не наносит ущерба качеству резки). Высокосернистая сталь менее чувствительна к образованию дефектов горения.

1.2.2 Лазерная сварка

При помощи лазерной сварки получают неразъемное соединение частей изделий путем локального расплавления металлов по примыкающим поверхностям. Источником нагрева служит концентрированный поток лазерного излучения. В результате плавления и кристаллизации металлических поверхностей возникает прочное их сцепление в виде сварного шва, основанное на межатомном воздействии [5]. На рисунке 1.10 приведена схема лазерной сварки (laser beam – лазерный луч, molten pool – ванна расплава, keyhole – замочная скважина, melted zone – расплавленная зона, workpiece travel – перемещение заготовки). Существует два метода лазерной сварки: шовная (глубокое проплавление) и точечная (сварка малых толщин $\delta \leq 1$ мм). Лазерная сварка часто выполняется в режиме "замочная скважина". Согласно ГОСТ EN 1011-6-2017, этот режим требует пучка с высокой плотностью мощности, способной испарить материал в точке взаимодействия. Лазерный пучок затем может создать (с помощью давления испаренного материала) глубокую полость формы, приближенной к цилиндрической. Стенки полости покрыты расплавленным материалом. Если этот процесс находится под контролем, полость вместе с лазерным лучом перемещается вдоль шва. Распределение тепла и материала в основном является двухмерным. Материал плавится в передней части полости и перемещается к ее задней стенке, где, застывая, образует металл сварного шва. Небольшая часть материала испаряется или удаляется в виде брызг в направлении вдоль оси лазерного луча. Режим "замочная скважина" обычно используется для сварки стыковых швов с полным или частичным проплавлением толстых деталей. Эта замочная скважина облегчает поглощение

световой энергии и распределение тепла, так что плавление заготовок в месте соединения приводит к образованию сварного шва [1].

Существуют такие методы получения соединений как пайка или механическое соединение. Однако они не в полной мере удовлетворяют технических требованиям таких изделий [13]. По сравнению с ними лазерная сварка обеспечивает малый объем расплавленного металла, незначительные размеры околошовной зоны термического влияния, высокой скорости нагрева и охлаждения металла [14]. При этом прочность сварного соединения при лазерной сварке выше, чем при ранее перечисленных методах.

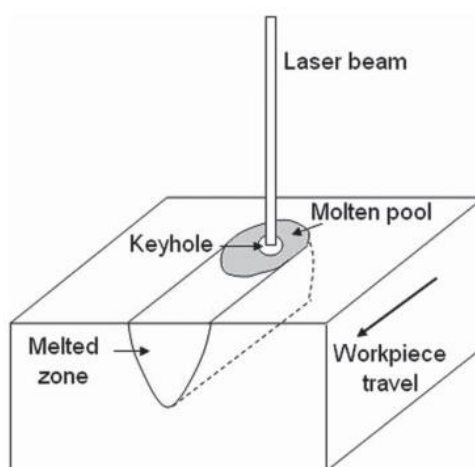


Рисунок 1.10 – Схема лазерной проникающей сварки [1]

Энергетические признаки характеризуются плотностью мощности E , Вт/см², и длительностью воздействия излучения τ , с. При сварке плотность мощности находится в диапазоне $10^5 \dots 10^7$ Вт/см². При более низкой плотности мощности более эффективны методы сварки дугой или газовым пламенем, а при более высокой происходит интенсивное испарение металла и образование дефектов сварного шва. Определение сочетания плотности мощности с длительностью воздействия излучения на материал влияет на конечный результат сварки, так как данное сочетание зависит от толщин свариваемых деталей и способов сварки. Существует три основные группы сочетания указанных параметров: 1). $E = 10^5 \dots 10^6$ Вт/см², $\tau > 10^{-2}$ с; 2). $E = 10^6 \dots 10^7$ Вт/см², $\tau < 10^{-3}$ с; 3). $E = 10^5 \dots 10^6$ Вт/см²; $10^{-3} \leq \tau \leq 10^{-2}$ с [5]. Перечисленные группы

отличаются энерговложением, толщиной обрабатываемых металлов и режимами работы лазеров.

При сварке отражение от зоны сварки характеризуется коэффициентом отражения R (рис.1.11). Этот коэффициент имеет две составляющие - коэффициент зеркального и диффузного отражения. При развитии процесса плавления коэффициент зеркального отражения достигает максимального значения и затем начинает уменьшаться, а коэффициент диффузного отражения ведет себя противоположным образом. Это объясняется изменением формы поверхности расплавленного металла с образованием лунки в процессе плавления. При этом суммарное отражение уменьшается, что может быть обусловлено увеличением поглощения излучения в лунке в результате повторного отражения и значительным перегревом поверхностного слоя расплавленного металла [4].

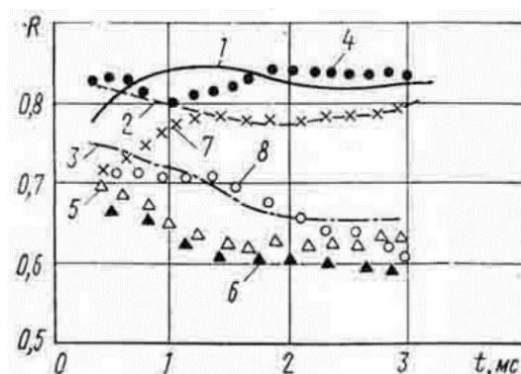


Рисунок 1.11 – Изменения коэффициента отражения R во времени в режиме нормального плавления поверхности различных металлов: 1 – Cu; 2 – Al; 3 – Ni; 4 – МН19; 5 - 47НД; 6 – сталь; 7 – МНЦ15-20; 8 – 29НК [4]

К концу действия импульса изменение составляющих коэффициентов отражения замедляется, но в ряде случаев наблюдается повышение коэффициента суммарного отражения, что соответствует заполнению лунки и охлаждению расплава к концу импульса [4].

В ряде работ [15-17] было изучено влияние различных параметров на процесс сварки.

В работе [15] исследовано влияние длительности импульса и пиковой мощности на глубину проплавления сварного шва при сварке титановых сплавов Ti6Al4V толщиной 3 мм с помощью импульсного Nd: YAG-лазера Lumonics JK760TR. На рисунке 1.12 по горизонтали отложены значения пиковой мощности (киловатты), по вертикали – глубина проплавления (миллиметры). Длительность импульса поддерживалась постоянной и равной 5 мс. Глубина проплавления увеличивается с увеличением пиковой мощности при постоянной длительности импульса и диаметре пятна. При более высоких пиковых уровнях мощности наблюдается ограничение при увеличении глубины проплавления. Эту ситуацию можно объяснить поглощением плазмы лазерного луча в замочной скважине. Не только глубина проплавления, но также зона термического влияния (ЗТВ) и ширина сварочной ванны связаны с пиковой мощностью лазера. Поглощение плазмы очень сильно в верхней части сварного шва (на поверхности материала), где энергия лазера высока, это приводит к увеличению сварочной ванны и ширины ЗТВ. При исследовании влияния длительности импульса на глубину проплавления, пиковая мощность оставалась постоянной, а длительность импульса принималась равной 5,7 и 10 мс. Авторы [15] пришли к выводу, что любое увеличение длительности импульса не влияет на глубину проплавления. Но благодаря более длительному времени взаимодействия между лазерным импульсом и деталями, была получена более широкая сварочная ванна и ЗТВ.

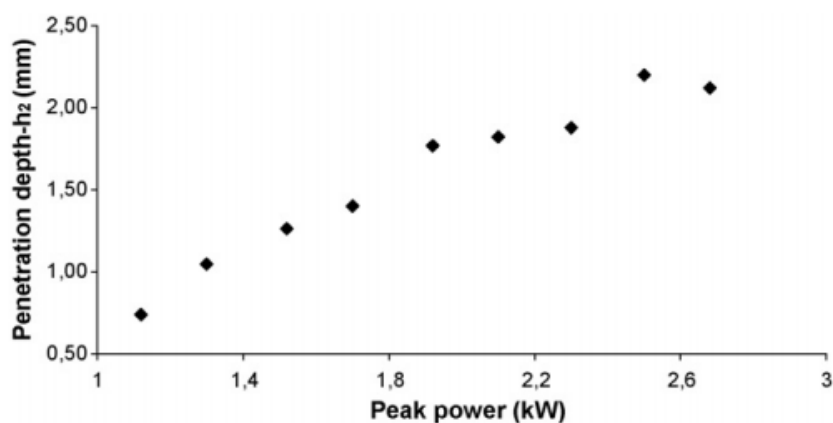


Рисунок 1.12 – Влияние пиковой мощности на глубину проникновения [15]

При исследовании лазерной сварки магниевого сплава АМ60В с помощью Nd: YAG-лазера непрерывного действия авторы [16] пришли к выводу, что ширина, глубина и площадь поперечного сечения сварочной ванны уменьшаются с увеличением скорости сварки. Пороговая плотность мощности лазера для формирования замочной скважины для этого сплава составляет около $1,2 \times 10^5$ Вт/см². Это намного меньше, чем для лазерной сварки автомобильных алюминиевых сплавов серии 5000, где пороговые значения находились в диапазоне $3,7 \times 10^5 - 8,4 \times 10^5$ Вт/см². Эту разницу можно объяснить гораздо более высоким равновесным давлением паров магния, чем у алюминия.

Авторами исследования [17] экспериментально исследованы характеристики лазерной микросварки тонких листов нержавеющей стали с использованием одномодового непрерывного волоконного лазера с высокоскоростной системой сканирования. Толщина листов – 50 мкм, мощность лазера от 10 до 70 Вт, диаметр пучка 34,8 мкм. На рисунках 1.13 и 1.14 по горизонтали приведены значения мощности лазера в ваттах, а по вертикали глубина сварного шва в микрометрах (рис. 1.13 и 1.14 (а)) и его ширина (рис. 1.13 и 1.14 (б)); используемый вспомогательный газ – N₂ (азот); скорость сканирования изменяется в диапазоне от 0,5 мс⁻¹ (коричневые кружки на графике) до 3 мс⁻¹ (зеленые треугольники на графике) с шагом 0,5 мс⁻¹; сварка с полным проплавлением.

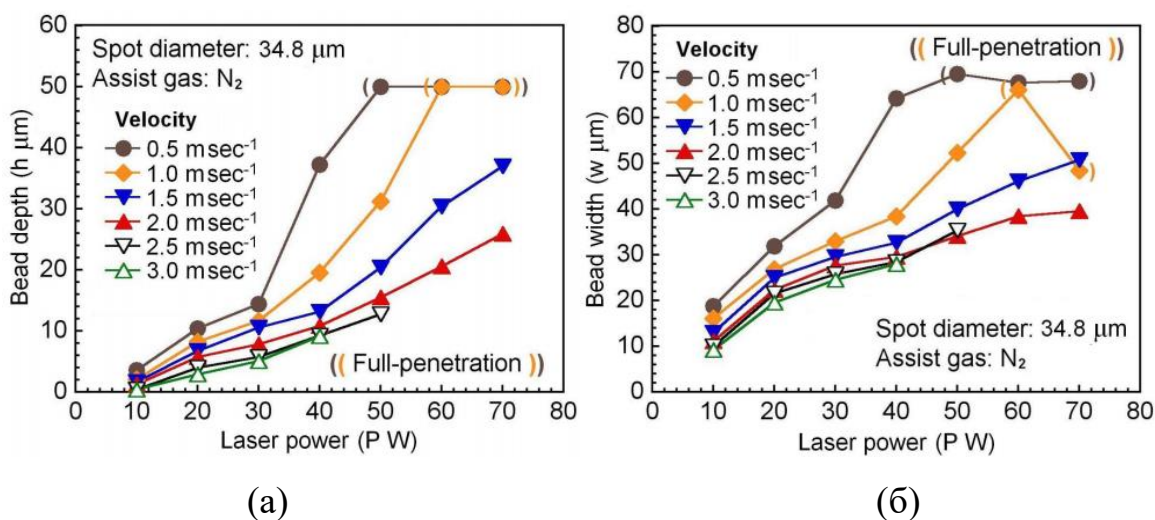
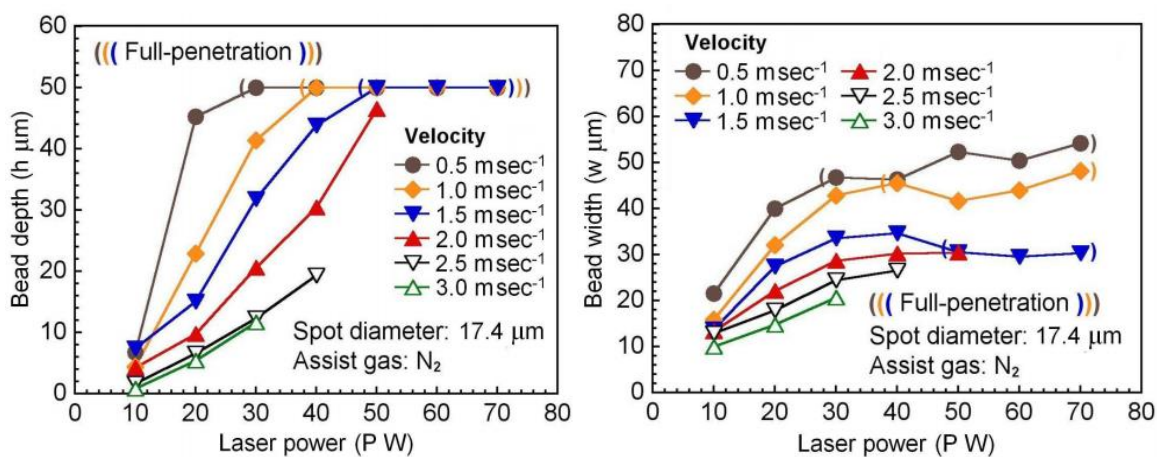


Рисунок 1.13 – Влияние мощности лазера и скорости сканирования на сварной шов с диаметром пятна 34,8 мкм: (а) глубина шва, (б): ширина шва [17]



(a)

(б)

Рисунок 1.14 – Влияние мощности лазера и скорости сканирования на сварной шов с диаметром пятна 17,4 мкм: (а) глубина шва, (б): ширина шва [17]

При исследовании зависимости между мощностью лазера, скоростью сканирования и размерами шва (рис.1.13) авторы установили, что при постоянной скорости сканирования увеличение мощности лазера существенно влияет на проплавление сварного шва. Увеличение мощности лазера увеличивает количество расплавленного металла, что приводит к расширению сварного шва. Подобный эффект получается и при низкой скорости сканирования, так как можно получить более широкий и глубокий сварной шов из-за более длительного времени взаимодействия лазерной энергии с образцом. При изменении размеров пятна также меняется геометрия сварного шва. Меньший диаметр пятна создает более высокую плотность мощности и приводит к более глубокому сварному шву, что означает, что тепло локализуется в небольшой части металла (рис.1.14). При более широком диаметре пятна происходит распространение мощности лазера на большую площадь. Следовательно, ширина сварного шва увеличивается с увеличением площади расплавленного основного металла. Очевидно, что меньший диаметр пятна может обеспечить более глубокое проникновение сварного шва при той же мощности лазера [17]. Также в рамках работы [17] авторами было установлено, что: 1). сварной шов становится больше с увеличением плотности энергии; 2).

сварочные дефекты появляются в сварном шве, когда мощность лазера и скорость сканирования превышают оптимальные условия лазерной сварки; 3). более высокая прочность сварного шва может быть достигнута при сварке внахлест ультратонкого листа с меньшим диаметром пятна и более высокой скоростью сканирования.

1.2.3 Лазерное сверление отверстий

Основными физическими процессами при лазерном сверлении являются разогрев, плавление и испарение материала из зоны лазерного воздействия. Для реализации данных процессов необходимо создать на поверхности обрабатываемой заготовки плотность мощности излучения $10^6 \dots 10^7$ Вт/см². Суть лазерного сверления: отверстие в материале растет в глубину за счет испарения при воздействии на поверхность сфокусированного лазерного пучка. Существует два вида лазерного формирования отверстий: пробивка («прошивка»), которая применяется для обработки сверхпрочных материалов (керамики и алмазов) и сверление отверстий. В первом случае на материал воздействуют одиночными импульсами мощного лазера (например, рубинового лазера, работающего в режиме свободной генерации). При этом заготовка помещается в фокусе лазерного излучения и остается неподвижной в процессе обработки. Под лазерным сверлением понимается прецизионный способ получения отверстий различного диаметра. Существует 2 независимых метода, используемые для этой операции. В одном случае происходит перемещение лазерного луча по изначально заданному контуру, при этом отверстие имеет форму, определяемую траекторией относительного перемещения луча. В другом случае (проекционный метод), формируемое отверстие повторяет форму лазерного пучка, которому придают нужное сечение с помощью масок (диафрагм) и проекционных систем [2].

Мерой качества получения малых отверстий является аспектное отношение – отношение глубины отверстия (толщины материала) к его диаметру. При обычном механическом сверлении оно составляет 2:1, при

ультразвуковом – 4:1. При лазерном сверлении можно получить очень большие значения аспектного соотношения (до 11:1 – в керамике и до 100:1 – в менее прочных материалах), что является важным достоинством этого метода. Еще одно достоинство – более высокая точность размещения отверстий при значительном сокращении времени обработки деталей [2].

На процесс сверления отверстий лазерным излучением могут влиять различные параметры. В работе [18] исследован процесс лазерного сверления пластин из жаропрочного никелевого сплава Inconel 718 толщиной около 1,9 мм, с термобарьерным покрытием, с помощью импульсного ND: YAG-лазера JK 300D (GSI, Великобритания, $\lambda = 1064$ нм) с излучением пятна размером 240 мкм. На рисунке 1.15 по горизонтали отложены значения количества импульсов, по вертикали – отношение глубины отверстия к толщине пластины. Авторы приняли во внимание тот факт, что толщина различных образцов не была строго одинаковой, отношение глубины отверстия к толщине пластины было принято для лучшего сравнения методом нормализации, в котором 1.0 обозначено сквозное отверстие (рис.1.15). Set1 – Set9 – наборы параметров лазера: длительность импульса равнялась 0.2, 0.5 и 1 мс; мощность – 68, 130 и 228 Вт. Как видно из рисунка 1.15, небольшое количество импульсов (<10 или <20) требовалось для достижения сквозных отверстий только при высокой пиковой плотности мощности, такой как в наборе 2, 3 и 6. Явление застоя в лазерном ударном сверлении появилось, когда пиковая плотность мощности снизилась (набор 4 и 5, особенно набор 7 и 8), поэтому глубина отверстий показала небольшое изменение с увеличением количества импульсов. Исходя из этого одной из причин низкой эффективности сверления является недостаточная пиковая плотность мощности, так как низкий ее уровень приводит к тому, что меньшая доля энергии доставляется выше порога абляции, и значительная часть энергии импульса теряется при нагреве материалов. В результате этого не происходит эффективного удаления материала [18].

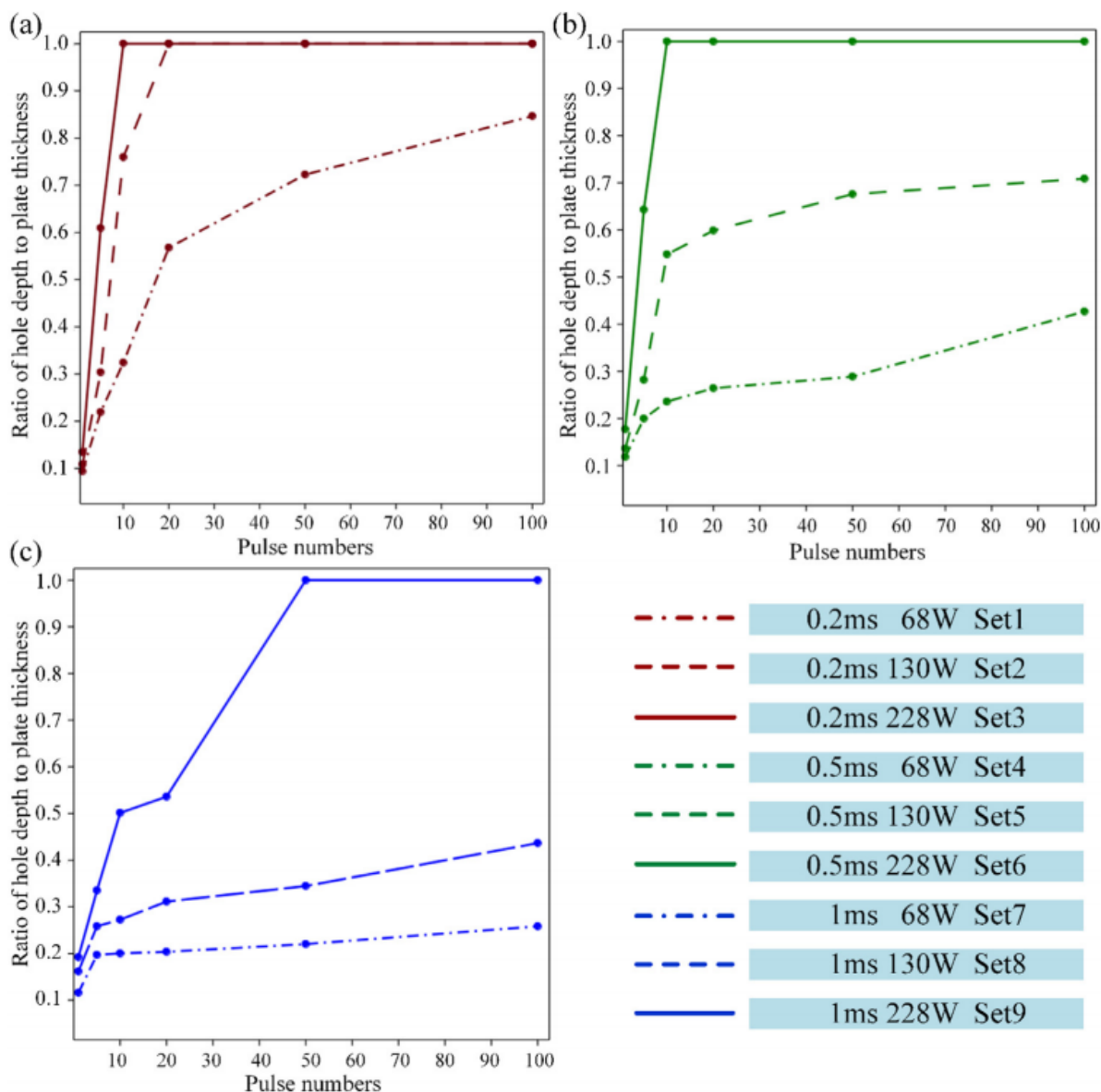


Рисунок 1.15 – Отношение глубины отверстия к толщине пластины при различной длительности импульса (а) 0,2 мс, (б) 0,5 мс, (с) 1 мс [18]

Природа вспомогательного газа является одним из наиболее важных аспектов при лазерной обработке металлов. В работе [19] исследовано влияние на абляцию алюминия и нержавеющей стали использования аргона, азота и сжатого воздуха для создания определенных отверстий в материале толщиной 1 мм с помощью лазерной системы с модуляцией добротности, излучающей импульсы на длине волны 1064 нм с длительностью 20 нс. Такие газы, как аргон или азот, защищают зону процесса от кислорода. Поэтому при их использовании происходило меньше экзотермических реакций, и диаметр сверления был меньше, чем у сжатого воздуха или без газа при одинаковых параметрах

процесса. Аргон – благородный газ, поэтому он действительно является инертным. Азот не является благородным газом и может вступать в реакции с другими элементами при температуре выше 1000°C, поэтому возможна экзотермическая реакция в процессе лазерного сверления. Возможные химические реакции, возникающие при использовании азота, могут привести к более высокой скорости абляции. Исходя из экспериментов, авторы [19] пришли к выводу, что скорость абляции для аргона ниже, чем для азота. Причиной этого эффекта является более быстрое охлаждение расплава при использовании аргона. При отсутствии газа или сжатого воздуха просверленные отверстия становятся больше из-за экзотермической реакции кислорода с поверхностью материала. Из-за окисления создается больше тепла и, следовательно, больше материала расплавляется. Повторно осажденный материал покрывает большую площадь путем абляции сжатым воздухом, чем аргоном благодаря эффекту экзотермической реакции. Наименьшая скважина с меньшим количеством повторно осажденного материала на поверхности может быть создана при использовании инертного газа. Наименьший угол боковой стенки просверленного отверстия достигается при использовании сжатого воздуха или азота. Чтобы получить хорошее качество скважины с ровными боковыми стенками и высокой скоростью абляции, во время процесса должна происходить экзотермическая реакция. Таким образом, сверление с использованием сжатого воздуха является наиболее эффективным процессом для нержавеющей стали и алюминия [19].

При рассмотренных выше методах лазерной обработки материалы обрабатываются длинными импульсами или непрерывным излучением. В основе этих технологий лежит образование заглубляющегося источника тепла, так как за счет только одной теплопроводности не удастся прогреть материал на достаточную глубину.

Лазерная маркировка и гравировка являются более молодыми методами обработки материалов и еще не до конца изучена. Рассмотрим процессы, происходящие при данном методе и основные закономерности.

1.3 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].

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].

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].

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-, CO₂ – и волоконные лазеры. Однако маломощные CO₂ - лазеры очень сильно отражаются от металлов и при использовании данного типа лазеров в целях гравировки металлических материалов, на заготовку наносят специальные поглощающие смеси.

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.1.16(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.1.16(b)) или даже до точки кипения, когда материал удаляется из целевой области в виде пара (рис.1.16(c)). При достаточно высокой энергии возникает высокое давление и появляется плазма (рис.1.16(d)). Плазма приводит к дополнительной нелинейности в процессе лазерной абляции [20].

В процессе лазерной гравировки сфокусированный лазерный луч сканируется по заготовке. 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 [21].

На рисунке 1.17 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 [21].

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 [21].

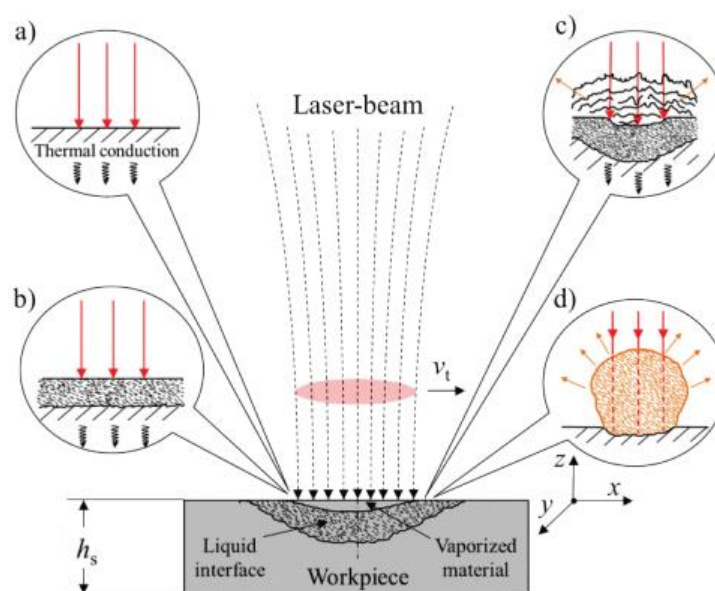


Рисунок 1.16 – Схема облученного лазером материала: нагревание (thermal conduction – теплопроводность) (a), плавление (b), испарение и плавление (c) и образование плазмы (d) [20]

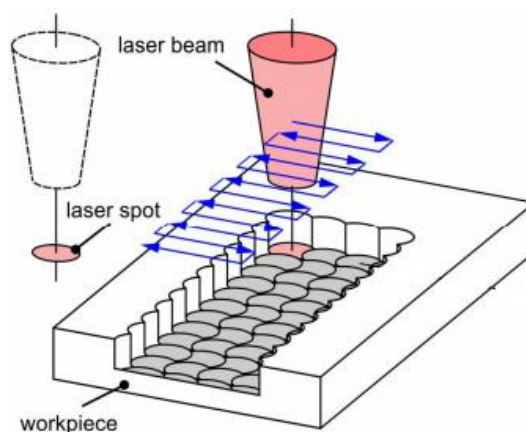
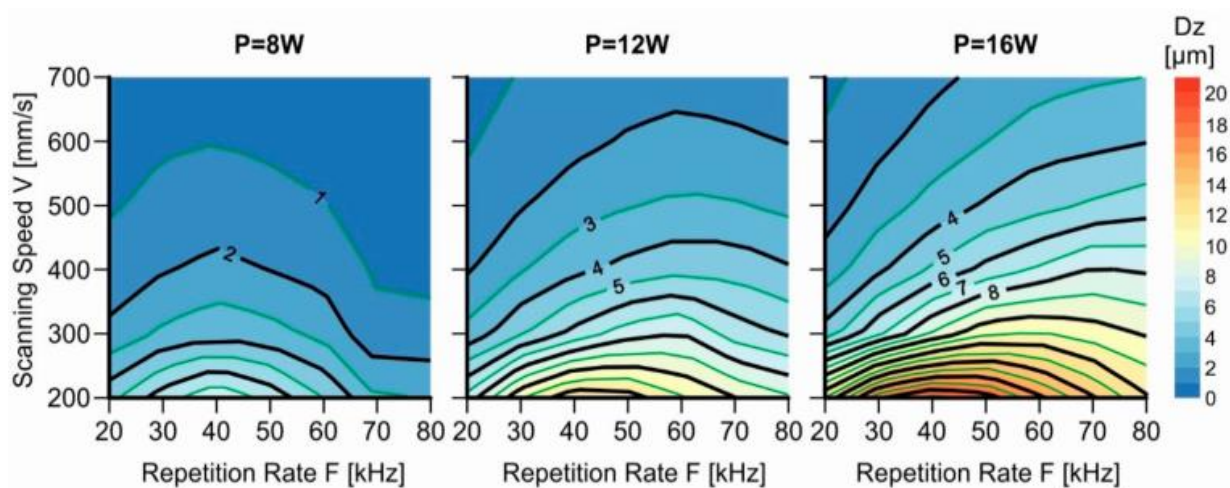
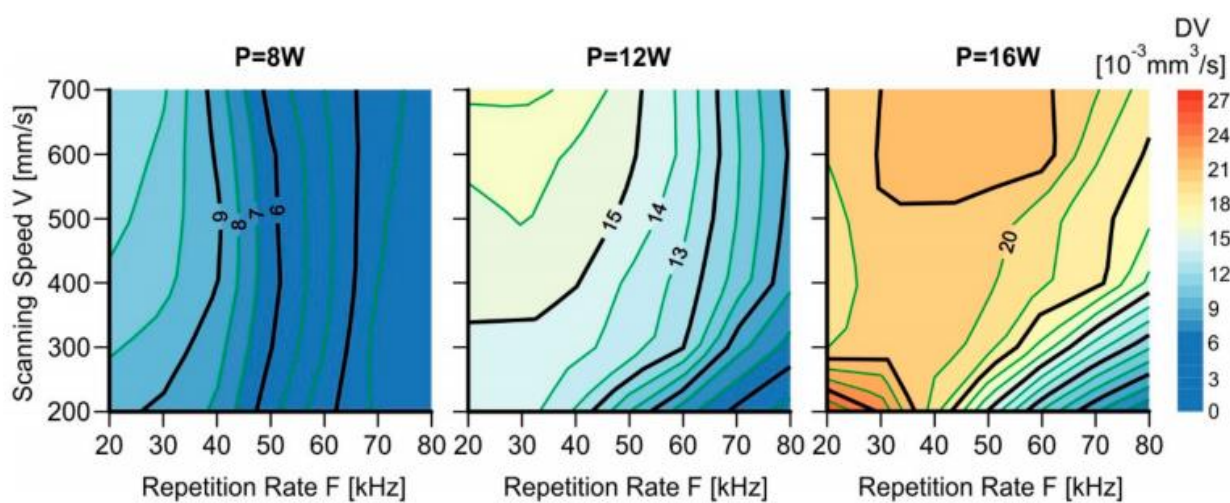


Рисунок 1.17 – Схематическое изображение процесса лазерной гравировки [21]

Исследование, проведенное в работе [21], 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 1.18 по горизонтали отложены значения частоты следования импульсов (килоггерцы), по вертикали – скорость сканирования (миллиметры в секунду). Справа представлена цветовая шкала толщины удаленного слоя (рис.1.18(a)) и скорости удаления материала (рис.1.18(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 мм³/с при параметрах процесса: средняя мощность $P = 16$ Вт, частота следования $F = 20$ кГц и скорость сканирования $V = 200$ мм/с. Авторы [21] 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 1.18 – (a): удаленный слой материала, толщиной Dz (микрометры); (b) скорость удаления материала DV (10^{-3} кубических миллиметров в секунду) [21]

В работе [22] 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 1.19 показана зависимость ширины гравировальной зоны (по вертикали) от тока накачки и расфокусировки. Для других параметров зоны гравировки в работе [22] 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.

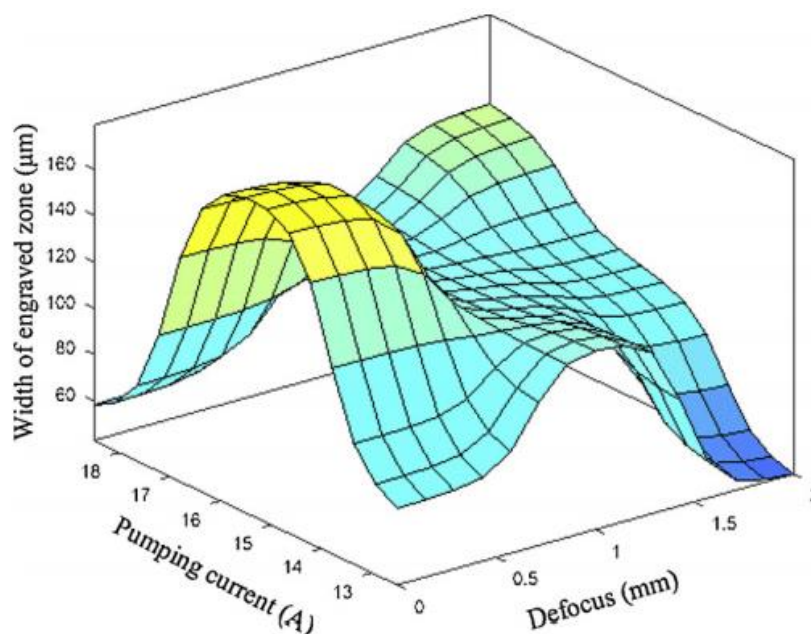


Рисунок 1.19 – Оценка ширины (микрометры) гравировальной зоны при помощи метода ANFIS [22]

1.3.1 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]. 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 заглублиение

будет небольшим за время импульса. Для объяснения процесса, происходящего при глубокой лазерной гравировке используют модель заглубляющегося 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 заглубляющегося источника не образуется и при обработке поверхности происходит незначительное заглубление. Поэтому, чтобы понять данные механизмы удаления материала, в ходе выполнения дипломной работы постараемся разобраться в процессах, происходящих при глубокой лазерной гравировке наносекундными импульсами.

2 Объекты и методы экспериментального исследования

2.1 Исследуемые образцы Al, бронзы, сплава ВК-8 и сталей различных марок

В рамках выполнения данной дипломной работы использовались такие материалы, как алюминий, бронза, сплав ВК – 8 и сталь марки 45, У7, У12, 40Х и 40Х13.

Алюминий. Простое вещество алюминий – это ферромагнитный 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 [23].

Таблица 2.1 – Физические свойства алюминия [23]

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

Бронза. Бронза – это семейство сплавов на основе меди, традиционно легированных оловом, но могут также использоваться и другие элементы (например, алюминий, кремний и никель). Бронзы несколько прочнее латуней (сплав меди с цинком), обладают высокой степенью коррозионной стойкости. [24]. В экспериментах использовалась бронза БрО10Ц2.

Таблица 2.2 – Химический состав в % бронзы БрО10Ц2 [25]

Fe	Si	P	Al	Cu	Pb	Zn	Sb	Sn	Примесей
до 0,3	до 0,02	до 0,05	до 0,02	85 - 90	до 0,5	1 - 3	до 0,3	9 - 11	всего 1

Таблица 2.3 – Физические свойства бронзы БрО10Ц2 [25]

Твердость по Бринеллю	75 НВ
Плотность	8500 кг/м ³
Температура плавления	1015 °С
Коэфф. теплопроводности	55,3 Вт/(м·град)
Теплоемкость	381 Дж/(кг·град)

Сплав ВК – 8. Согласно ГОСТ 3882 – 74, твердый сплав ВК-8 представляет собой смесь зерен карбида вольфрама (92 %) на кобальтовой связке (кобальт – связующее звено (8%)). Кобальт внешне схож с железом, но имеет более темный оттенок. Его роль заключается в том, чтобы придать тягучесть и прочность сплаву ВК-8 [26].

Таблица 2.4 – Свойства сплава ВК-8 [26][27]

Твердость по Бринеллю	774,4 НВ
Плотность	14500 кг/м ³
Температура плавления	2750 °С
Коэфф. теплопроводности	50,2 Вт/(м·°С)
Теплоемкость	167,6 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 [28]. С повышением содержания углерода в стали возрастает ее твердость, прочность и уменьшается пластичность и вязкость [29].

В экспериментах использовались стали следующих марок: сталь 45 (содержание углерода 0,45%); сталь У7 (содержание углерода 0,7%); сталь У12 (содержание углерода 1,2%); сталь 40Х (содержание хрома 0,8..1,1%) и сталь 40Х13 (содержание хрома 12...14%).

Таблица 2.5 – Химический состав в % стали 45 [30]

С	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu	Примечание
0,42-0,5	0,17-0,37	0,5-0,8	≤0,25	≤0,3	≤0,04	≤0,035	≤0,3	As ≤0,08 N ≤0,008

Таблица 2.6 – Свойства стали 45 [30]

Твердость по Бринеллю	170 НВ
Плотность	7700 кг/м ³
Температура плавления	1485 °С
Коэфф. теплопроводности	38 Вт/(м·°С)
Теплоемкость	580 Дж/(кг·°С)

Таблица 2.7 – Химический состав в % стали У7 [30]

С	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu
0,66 -0,73	0,17-0,33	0,17-0,33	≤0,4	≤0,25	≤0,028	≤0,03	≤0,25

Таблица 2.8 – Свойства стали У7 [30]

Твердость по Бринеллю	187 НВ
Плотность	7830 кг/м ³
Температура плавления	1485 °С
Коэфф. теплопроводности	39 Вт/(м·°С)
Теплоемкость	733 Дж/(кг·°С)

Таблица 2.9 – Химический состав в % стали У12 [30]

С	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu
1,16 -1,23	0,17-0,33	0,17-0,33	≤0,2	≤0,25	≤0,028	≤0,03	≤0,25

Таблица 2.10 – Свойства стали У12 [30]

Твердость по Бринеллю	207 НВ
Плотность	7684 кг/м ³
Температура плавления	1485°С
Коэфф. теплопроводности	34 Вт/(м·°С)
Теплоемкость	603 Дж/(кг·°С)

Таблица 2.11 – Химический состав в % стали 40Х [30]

С	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 2.12 – Свойства стали 40Х [30]

Твердость по Бринеллю	217 НВ
Плотность	7767 кг/м ³
Температура плавления	1485°С
Температура кипения	3000°С
Коэфф. теплопроводности	34 Вт/(м·°С)
Теплоемкость	572 Дж/(кг·°С)

Таблица 2.13 – Химический состав в % стали 40Х13 [30]

С	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	S	P	Cu	Примечание
0,36	≤0,	≤0,	12,0	≤0,	≤0,	≤0,		≤0,	≤0,	≤0,	Ti ≤0,2
-	8	8	-	3	6	2	0,2	025	03	3	
0,45			14,0								

Таблица 2.14 – Свойства стали 40Х13 [30]

Твердость по Бринеллю	186 НВ
Плотность	7539 кг/м ³
Температура плавления	1485°С
Коэфф. теплопроводности	28 Вт/(м·°С)
Теплоемкость	563 Дж/(кг·°С)

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 [31].



Рисунок 2.1 – Лазерный маркер «МиниМаркер 2» [31]

Таблица 2.15 – Технические характеристики системы МиниМаркер 2-20А4 [31]

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 [31].

2.3 Методы экспериментального исследования

В ходе выполнения дипломной работы была проведена глубокая лазерная гравировка 3 материалов – алюминия, бронзы и сплава ВК-8. Обработка проводилась при следующем режиме работы лазера:

- $\tau = 200$ нс – длительность импульса;
- $V = 20$ кГц – частота следования импульсов;
- $U = 500$ мм/с – скорость перемещения луча;
- $P = 100\%$ (20 Вт) - мощность.

На образце алюминия гравировался прямоугольник размером 30×10 мм. Затем на том же месте гравировался прямоугольник, длина которого была на 1 мм короче предыдущего, то есть размером 29×10 мм. Таким образом проводилась гравировка, пока размер прямоугольника не стал равным 17×10 мм. В результате получались ступеньки, выгравированные в образце (рис.2.2,2.3).

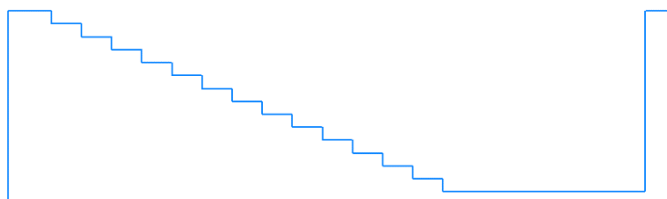


Рисунок 2.2 – Схема получившихся в результате гравировки алюминия ступеней



Рисунок 2.3 – Гравированный образец алюминия

С образцами бронзы и сплава ВК-8 проводилась подобная операция, только размеры прямоугольника составляли 15×8 , 10×8 , 5×8 и 2×8 (рис.2.4, 2.5).

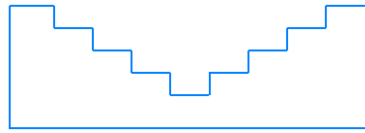
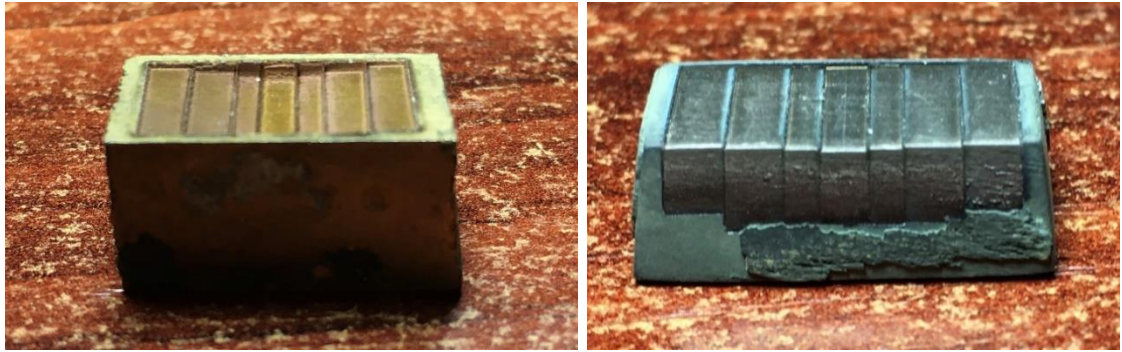


Рисунок 2.4 – Схема получившихся в результате гравировки бронзы и сплава ВК-8 ступеней



(а)

(б)

Рисунок 2.5 – Гравированные образцы: (а) бронза; (б) сплав ВК-8

При обработке материалов на одной ступени совершалось 10 проходов лазера.

Далее производилось измерение высоты каждой ступени при помощи микроскопа, перпендикулярно которому образец устанавливался на устойчивом столике. Микроскоп фокусировался на самую нижнюю ступеньку и производился замер по шкале. Десятые доли миллиметра отмерялись по шкале Нониуса.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Выпускная квалификационная работа посвящена исследованию различных металлических материалов, которые являются одними из самых востребованных в промышленности и жизни людей на сегодняшний день. Основой исследования является воздействие лазерного излучения на вещество в процессе глубокой лазерной гравировки 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:

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

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурирующих методов обработки металлических материалов, существующих на данный момент, необходимо проводить систематически, поскольку каждый день происходит развитие и внедрение новых технологий. Анализ конкурентных методов с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности изучаемого метода и определить направления для ее будущего повышения.

Основным конкурентом лазерного метода обработки является механическая обработка металлов. В нее входит фрезерование, резание,

шлифование и т.п. 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.

Анализ производится с применением оценочной карты, приведенной в таблице 4.1. Экспертная оценка производится по техническим характеристикам и экономическим показателям по 5 бальной шкале, где 1 – наиболее низкая оценка, а 5 – наиболее сильная. Общий вес всех показателей в сумме должен составлять 1.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _{к1}	Б _ф	Б _{к1}
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
Скорость обработки материалов	0,11	5	3	0,55	0,33
Наличие отходов	0,11	1	4	0,11	0,44
Качество поверхности после обработки	0,11	5	3	0,55	0,33
Толщина обрабатываемой детали	0,07	2	5	0,14	0,35
Производительность	0,1	5	3	0,5	0,3
Диапазон типов материалов, которые могут быть обработаны данным методом	0,08	5	5	0,4	0,4
Энергоэффективность	0,1	4	2	0,4	0,2
Возможность обработки легкодеформируемых и нежестких заготовок или деталей	0,08	5	1	0,4	0,08
Раскрой материалов по сложному криволинейному контуру	0,07	5	2	0,35	0,14

Продолжение таблицы 4.1

Экономические критерии оценки эффективности					
Стоимость оборудования	0,1	4	3	0,4	0,3
Финансирование научно-исследовательской работы	0,07	3	3	0,21	0,21
Итого	1	44	34	4,01	3,08

Расчет конкурентоспособности, на примере энергоэффективности, определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i = 0,1 \cdot 4 = 0,4, \quad (4.1)$$

где K – конкурентоспособность метода; V_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.

4.1.2 SWOT-анализ

SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды исследуемого метода.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT-анализа

Сильные стороны	Слабые стороны
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.	
Возможности	Угрозы
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.	

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

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

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

	W1	W2	W 3	W4
O1	-	-	-	-
O2	-	-	-	-
O3	-	-	-	-
O4	-	-	+	-

Таблица 4.5 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

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

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

	W1	W2	W 3	W4
T1	+	-	-	-
T2	-	-	+	+
T3	+	+	+	+

Результаты анализа представлены в итоговой таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	<p align="center">Strengths (сильные стороны)</p>	<p align="center">Weaknesses (слабые стороны)</p>
<p align="center">Opportunities (возможности)</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>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>S6. Квалифицированный персонал.</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>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 кадров по работе с научной разработкой.</p> <p>O4W3 – проведение новых научных исследований дает знания об особенностях лазерной обработки различных типов материалов.</p>

Продолжение таблицы 4.7

	<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>Threats (угрозы)</p> <p>T1. Ограничение финансирования со стороны ТПУ;</p> <p>T2. Развитая конкуренция технологий производства;</p> <p>T3. Отсутствие спроса на технологию.</p>	<p>T1S1 – экономичность и энергоэффективность метода и оборудования позволяют снизить затраты на электроэнергию и опытные образцы;</p> <p>T2S1S2S3S4S5 – данный метод имеет ряд преимуществ перед другими технологиями, и несмотря на дороговизну оборудования является одним из наиболее применяемых на сегодняшний день.</p>	<p>T1T3W1 – поиск дополнительных спонсоров для закупки оборудования поможет решить денежный вопрос;</p> <p>T2T3W3W4 – обучение персонала или наем обученных специалистов будут способствовать внедрению данного метода на многие производства;</p> <p>T3W2 – использование мер защиты и 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.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ осуществляется в порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение количества исполнителей для каждой из работ;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы, приведен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Научный руководитель
	2	Календарное планирование выполнения ВКР	Инженер, научный руководитель
Выбор способа решения поставленной задачи	3	Обзор научной литературы	Инженер
	4	Выбор методов исследования	Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Планирование эксперимента	Инженер, научный руководитель
	6	Закупка образцов для эксперимента	Инженер
	7	Проведение эксперимента	Инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Обработка полученных данных	Инженер

Продолжение таблицы 4.8

	9	Оценка правильности полученных результатов	Инженер, научный руководитель
Оформление отчета по НИР	10	Составление пояснительной записки	Инженер

4.2.2 Определение трудоёмкости выполнения работ и разработка графика проведения научного исследования

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления сметы.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (4.2)$$

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

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

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

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{ч_i}, \quad (4.3)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, рабочие дни;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на заданном этапе, чел.

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4.4)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

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

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48 \quad (4.5)$$

где $T_{\text{кал}}$ – общее количество календарных дней в году; $T_{\text{вых}}$ – общее количество выходных дней в году; $T_{\text{пр}}$ – общее количество праздничных дней в году.

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}		
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{\text{ожі}}$, чел-дни					
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2				
1. Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	2	-	4	-	2,8	-	2,8	-	4	-

Продолжение таблицы 4.9

2. Календарное планирование выполнения ВКР	1	3	3	4	1,8	3,4	0,9	1,7	1	3
3. Обзор научной литературы	-	14	-	17	-	15,2	-	15,2	-	22
4. Выбор методов исследования	-	3	-	4	-	3,4	-	3,4	-	5
5. Планирование эксперимента	2	5	4	8	2,8	6,2	1,4	3,1	2	5
6. Закупка образцов для эксперимента	-	4	-	7	-	5,2	-	5,2	-	8
7. Проведение эксперимента	-	13	-	17	-	14,6	-	14,6	-	22
8. Обработка полученных данных	-	11	-	14	-	12,2	-	12,2	-	18
9. Оценка правильности полученных результатов	2	3	4	5	2,8	3,8	1,4	1,9	2	3
10. Составление пояснительной записки	-	10	-	14	-	11,6	-	11,6	-	17
Итого:	7	66	15	90	10,2	75,6	6,5	68,9	9	103

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

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Диаграмма Ганта

№	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)

В результате выполнения данного подраздела разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей.

4.2.3 Бюджет научно-исследовательской работы

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовать следующую группировку затрат по следующим статьям:

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

4.2.3.1 Расчет материальных затрат научно-исследовательской работы

Материальные затраты — это затраты организации на приобретение сырья и материалов для создания готовой продукции.

Данная часть включает затраты всех материалов, используемых при проведении экспериментов. Результаты расчета затрат представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Материальные затраты

Наименование статей	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Итого затраты, руб.
Алюминий	кг	0,1	106,4	10,6
Бронза	кг	0,1	400	40
Сплав ВК-8	кг	0,1	3500	350
Сталь 45	кг	0,1	58	5,8
Сталь У7	кг	0,1	62	6,2
Сталь У12	кг	0,1	70	7

Продолжение таблицы 4.11

Сталь 40X	кг	0,1	68	6,8
Сталь 40X13	кг	0,1	209	20,9
Защитные очки	шт.	1	1800	1800
Итого:				2247,3

4.2.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

$$N_A = \frac{1}{n}, \quad (4.6)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{N_A \cdot I}{12} \cdot t, \quad (4.7)$$

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

Таблица 4.12 – Затраты на оборудование

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во ед.	Срок полезного использования, лет	Время использования, мес.	$N_A, \%$	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	Микроскоп Альтами	1	5	0,1	20	50034	83

Продолжение таблицы 4.12

	СМ0745 со столом Альтами СМ-13						
3	Ноутбук Asus	1	3	0,39	33	39900	428
Итого:						8179 руб.	

4.2.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20–30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в табл. 4.15.

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

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.8)$$

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:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (4.9)$$

где $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (таблица 4.9).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{51285 \cdot 10,4}{251} = 2125 \text{ руб.}, \quad (4.10)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

F_d – 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):

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

Таблица 4.13 – 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:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.} \quad (4.11)$$

– для инженера:

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

где $Z_{\text{тс}}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, 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 4.14 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИР	$Z_{тс}$, 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 4.15 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов		Трудо-емкост ь, чел.-дн.		Заработная плата, приходящаяся 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 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 исследования	-	5	-	1664,9	-	8324,5
5	Планирование эксперимента		2	5	2125	1664,9	4250	8324,5
6	-	Закупка образцов для эксперимента	-	8	-	1664,9	-	13319,2
7	-	Проведение	-	22	-	1664,9	-	36627,8

Продолжение таблицы 4.15

		эксперимента						
8	-	Обработка полученных данных	-	18	-	1664,9	-	29968,2
9	Оценка правильности полученных результатов		2	3	2125	1664,9	4250	4994,7
10	-	Составление пояснительной записки	-	17	-	1664,9	-	28303,3
Итого:							190609,7	
руб.								

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

4.2.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 19125 = 2868,75 \text{ руб.} \quad (4.12)$$

– 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:

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

4.2.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

Для руководителя:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,3 \cdot (19125 + 2868,75) = 6598,13 \text{ руб.} \quad (4.13)$$

Для инженера:

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

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

Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ):

- 22 % – на пенсионное страхование;
- 5,1 % – на медицинское страхование;
- 2,9 % – на социальное страхование.

Таблица 4.16 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	Итого, руб.
Руководитель НИР	19125	2868,75	0,3	6598,13
Инженер	171484,7	25722,71		59162,22

4.2.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать, ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии и т.д. Сумма 5 статьи затрат, рассчитанных выше, приведена в таблице ниже и используются для расчета накладных расходов.

Величина накладных расходов определяется по формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (4.14)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,16.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИР по форме, приведенной в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Группировка затрат по статьям

Статьи							
1	2	3	4	5	6	7	8
Амортизация, руб.	Сырье, материалы, руб.	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Отчисления во внебюджетные фонды, руб.	Итого без накладных расходов, руб.	Накладные расходы, руб.	Итого бюджетная стоимость, руб.
8179	2247,3	190609,7	28591,46	65760,35	361148,16	57783,7 1	418931 ,87

4.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научно-исследовательской работы получен в процессе оценки бюджета затрат двух вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принят за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

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

- 1) механический способ обработки металлических материалов;

Интегральный финансовый показатель разработки рассчитывается как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (4.15)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{\max} – максимальная стоимость исполнения.

$$\Phi_{\text{текущ.НИР}} = 418931,87 \text{ руб}; \Phi_{\text{исп.2}} = 411919,8 \text{ руб}$$

$$I_{\text{фин р}}^{\text{исп.НИР}} = \frac{\Phi_{\text{тек.НИР}}}{\Phi_{\max}} = \frac{418931,87}{418931,87} = 1$$

$$I_{\text{фин р}}^{\text{исп.НИР}} = \frac{\Phi_{\text{тек.НИР}}}{\Phi_{\max}} = \frac{411919,8}{418931,87} = 0,98$$

В результате расчета консолидированных финансовых показателей по двум вариантам разработки вариант 2 (исполнение 2) с меньшим перевесом признан считается более приемлемым с точки зрения финансовой эффективности.

Далее необходимо произвести оценку ресурсоэффективности проекта, определяемую посредством расчета интегрального критерия, по следующей формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.16)$$

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 4.18.

Таблица 4.18 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения НИР

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка текущего метода	Бальная оценка аналога
Скорость обработки материалов	0,13	5	3
Наличие отходов	0,13	1	4

Продолжение таблицы 4.18

Качество поверхности после обработки	0,13	5	3
Толщина обрабатываемой детали	0,08	2	5
Производительность	0,12	5	3
Диапазон типов материалов, которые могут быть обработаны данным методом	0,1	5	5
Энергоэффективность	0,12	4	2
Возможность обработки легкодеформируемых и нежестких заготовок или деталей	0,1	5	1
Раскрой материалов по сложному криволинейному контуру	0,09	5	2
Итого:	1	4,12	3,08

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,13 \cdot 5 + 0,13 \cdot 1 + 0,13 \cdot 5 + 0,08 \cdot 2 + 0,12 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,12 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,09 \cdot 5 = 4,12$$

$$I_{p2} = 0,13 \cdot 3 + 0,13 \cdot 4 + 0,13 \cdot 3 + 0,08 \cdot 5 + 0,12 \cdot 3 + 0,1 \cdot 5 + 0,12 \cdot 2 + 0,1 \cdot 1 + 0,09 \cdot 2 = 3,08$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения НИР определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{р-исп.i}}{I_{фин.p}^{исп.i}} \quad (4.17)$$

$$I_{исп.1} = \frac{4,12}{1} = 4,12; \quad I_{исп.2} = \frac{3,08}{0,98} = 3,14$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.1}}}{I_{\text{исп.2}}} = \frac{4,12}{3,14} \approx 1,31. \quad (4.18)$$

Таблица 4.19 – Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

№ п/п	Показатели	Текущий метод	Аналог
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,98
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,12	3,08
3	Интегральный показатель эффективности	4,12	3,14
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,31	0,76

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.

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 418931,87 руб;

4. Результат оценки эффективности ИР показывает следующие выводы:

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

2) значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,12, по сравнению с 3,08;

3) значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 4,12, по сравнению с 3,14, 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.