

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

---

ИШНКБ

Направление подготовки Машиностроение 15.03.01

Отделение школы (НОЦ) Электронной инженерии

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Импульсная лазерная сварка высокопрочных легированных сталей</b>

УДК 621.791.72.01:669.15-194.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1В41	Карпов Александр Сергеевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Киселёв А.С.	К.Т.Н		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Николаенко В.С.	-		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И.Л.	-		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Машиностроение 15.03.01	Хайдарова А.А	К.Т.Н		

Томск – 2018 г.

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности  
 Направление подготовки: 15.03.01 Машиностроение  
 Отделение электронной инженерии

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Хайдарова А.А.  
 (Подпись) (Дата)

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

В форме:

Бакалаврской работы
---------------------

Студенту:

Группа	ФИО
1В41	Карпову Александру Сергеевичу

Тема работы:

<b>Импульсная лазерная сварка высокопрочных легированных сталей</b>
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:	1.06.2018 г.
--	--------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Импульсная лазерная сварка высокопрочной легированной стали.</li> <li>Импульсный Nd:YAG лазер.</li> <li>Пластины из стали 12Х18Н10Т 200х100х1 мм.</li> </ol>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Обзор научно-технической информации по импульсной лазерной сварке высокопрочных легированных сталей.</li> <li>Разработка технологического процесса стыкового соединения.</li> <li>Контроль качества соединения.</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Механические свойства и химический состав свариваемого материала.</li> <li>Диаграмма минимальной мощности требуемой для расплава металла.</li> <li>Карта эскиза стыкового соединения.</li> </ol>

	4. Маршрутная и операционная карты технологического процесса.
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
1-7 разделы	Киселев Алексей Сергеевич
8. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Николаенко Валентин Сергеевич
9. Социальная ответственность	Мезенцева Ирина Леонидовна

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	23.02.2018 г.
---	---------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	Киселев А.С.	К.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1В41	Карпов Александр Сергеевич		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 84 с., 20рис., 14табл., 50 источников.

Ключевые слова: лазер, импульсная лазерная сварка, микросварка, нержавеющие стали, профиль пучка.

Объектом исследования является импульсная лазерная сварка.

Цель работы – исследование и разработка технологии импульсной лазерной сварки деталей малых толщин.

В процессе исследования на основании прочитанной литературы, изучены особенности импульсной лазерной сварки деталей малых толщин и моделирование управлением процессом сварки.

Область применения лазерной сварки: машиностроение, медицина, приборостроение.

В настоящей работе использованы следующие сокращения:

ВКР	Выпускная квалификационная работа
НИ	Научно-исследовательский
ИЛС	Импульсная лазерная сварка
$V_c$	Скорость сварки
$q_{оз}$	Расход защитного газа
$T_{и}$	Длительность импульса
$T_{п}$	Длительность паузы между импульсами
$N$	Мощность излучения
Расходим.	Расходимость луча
$D_{л}$	Диаметр луча
$L_{ф}$	Фокусное расстояние

## Содержание

1. Введение .....	8
2. Выбор источника лазерного излучения для микросварки .....	10
2.1. Устройство лазера .....	10
2.1.2. Волоконный лазер .....	10
2.1.3. Nd:YAG-лазер .....	11
2.2. Доставка пучка .....	20
2.2.1 Доставка по волокну.....	20
2.2.2 Сканирующие головки .....	22
2.2.3. Лазерная производительность .....	23
2.3. Профили пучка .....	24
2.4. Сравнение Nd:YAG-лазера и волоконного лазера.....	26
3. Процесс лазерной микросварки.....	27
3.1. Режимы сварки .....	27
3.2 Сварные швы .....	32
3.3. Материалы .....	33
4. Дефекты и оценка микросварных соединений .....	36
4.1. Дефекты сварки .....	36
4.2. Оценка сварных швов .....	38
5. Применение лазерной сварки .....	40
5.1. Примеры использования лазерной микросварки.....	40
6. Моделирование управления процессом импульсной сварки.....	44
6.1. Модель многомерного управляемого процесса импульсной лазерной сварки.....	44
6.2 Анализ процесса сварки как объекта управления. ....	46
6.3 Последовательность выбора оптимальных режимов ИЛС. ....	48
6.4 Выбор оптимальной частоты следования импульсов .....	50
7. Выводы .....	51
8. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ..	55

8.1 Анализ конкурентных технических решений.....	55
8.2 SWOT-анализ.....	56
8.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	58
8.3.1 Расчет материальных затрат НТИ .....	58
8.3.2 Основная и дополнительная заработная плата исполнителей .....	59
8.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	60
8.3.4 Накладные расходы .....	60
8.3.5 Формирование бюджета затрат НИ проекта.....	61
8.4 Вывод .....	62
9. Социальная ответственность .....	64
9.1 Производственная безопасность.....	64
9.1.1 Лазерное излучение .....	65
9.1.2 Отклонение параметров микроклимата в помещении.....	67
9.1.3 Электробезопасность.....	69
9.2. Экологическая безопасность.....	70
9.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. ....	71
9.3.1 Пожарная безопасность.....	71
9.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	73
Заключение .....	74
Литература.....	75
Приложение А .....	80

## 1. Введение

Во многих отраслях промышленности и техники широко используются листовые конструкции и элементы из коррозионно-стойких сталей малых толщин. Данные изделия применяются для транспортировки агрессивных жидкостей и газов при различных температурах и в вакуумплотных соединениях. Назначение и условия эксплуатации изделий предъявляют к ним свои специфические требования. Сварное соединение должно обладать достаточной прочностью и герметичностью. Работа в агрессивной среде при высоких температурах требует повышенной коррозионной стойкости. Кроме того, данные изделия должны обладать повышенной надежностью. Это вызвано тем, что они, как правило, относятся к изделиям ответственного назначения [1].

Благодаря высокой концентрации энергии в импульсе лазерного излучения, данный метод обеспечивает минимальное тепловложение в детали, и лазерный луч легко совмещается со стыком свариваемых деталей. Внедрение лазерной сварки тонкостенных пластин позволяет снизить процент дефектных изделий и трудоемкость их изготовления, а также увеличить производительность по сравнению с другими видами сварки. Импульсное лазерное воздействие характеризуется жестким термомодеформационным циклом, вызывающим изменения в структуре материала, появление напряженного состояния и пластической деформации, что приводит к возникновению микродефектов (микропор, микротрещин), значительно ухудшающих механические свойства, а, следовательно, снижает надежность и долговечность изделий. В связи с этим возникает необходимость исследовать влияние режимов импульсной лазерной сварки на прочность сварных соединений.

С помощью моделирования процесса сварки можно прогнозировать получаемое в результате воздействия сварочного источника теплоты температурное поле, либо размеры проплавления при заданных режимах сварки, получать термические циклы в точках сварного шва и прилегающих к нему участках.



Однако, большой интерес представляют задачи, которые позволяют оптимизировать процесс сварки, т.е. определять оптимальные с точки зрения получения заданных эксплуатационных свойств сварного соединения режимы сварки.

Таким образом, исследование влияния режимов импульсной лазерной сварки на эксплуатационные характеристики получаемого сварного соединения, разработка методов моделирования оптимального процесса сварки является актуальной задачей.

Целью выпускной квалификационной работы является изучение особенностей импульсной лазерной сварки деталей малых толщин и моделирование управления процессами сварки.

Термин "микросварка" также известный под названием прецизионная сварка или микросоединение, несколько размыт. Вероятно, будет очень трудно достичь согласия в выборе его точного определения.

Особенности процесса:

- очень тонкие швы(размеры пятна лазерного инструмента на обрабатываемой детали могут варьироваться от 10 мкм до 100 мкм);
- меньшие искажения и малая зона термического воздействия;
- надежность и стабильность процесса;
- высокая скорость;
- сварка материалов с высоким коэффициентом отражения.

Преимущества лазерной микросварки :

- низкий уровень потока вводимого тепла: энергия доставляется только в ту область, где она необходима, и это можно проконтролировать;
- чистые швы: в дополнение к эстетическим преимуществам изделия с чистыми швами легче стерилизовать, ими легче манипулировать при сборке деталей в конструкционные узлы;
- сильные швы: лазеры обеспечивают высокую прочность при минимальном количестве сварных швов;

-герметичные швы: в отличие от пайки, лазеры могут обеспечить безупречную герметичность шва, необходимую для многих применений [2.3].

## 2. Выбор источника лазерного излучения для микросварки

### 2.1. Устройство лазера

Основные компоненты, входящие в состав лазера (рис.1), -это рабочая среда, способная генерировать излучение и усиливать свет, когда к ней прикладывается энергия возбуждения, и резонатор, обеспечивающий усиление интенсивности излучения за счет многопроходного отражения света через рабочую среду (его образуют передние и задние зеркала: часть света, которая проходит через, частично пропускающее переднее зеркало, превращается в выходное лазерное излучение и составляет пучок, используемый при обработке).

#### 2.1.1. CO<sub>2</sub>-лазер

Для CO<sub>2</sub>-лазера рабочая среда представляет собой газовую смесь (в основном гелий, азот и диоксид углерода), а энергии возбуждения, которая обеспечивает приращение энергии входного сигнала, поступает из электрического разряда, пропускаемого через газ. Длина волны излучения составляет 10,6 мкм. для твердотельного лазера усиливающей средой, как правило, является стержень YAG (алюмоиттриевый гранат), легированный примерно 1% атомов Nd (неодима), а энергию возбуждения обеспечивает широкополосный свет от пульсирующей лампы-вспышки. Длина волны выходном лазерного излучения 1,064 мкм.

#### 2.1.2. Волоконный лазер

Для волоконного лазера усиливающей средой является стекловолокно, легированное иттербием. Накачка достигается введением в усиливающую рабочую среду света от лазерных диодов. Конфигурации ввода в усилитель света от лазерных диодов, генерирующих излучение на длине волны 950 нм, разные: свет накачки может вводиться в том же направлении, что и сигнал, в противоположном направлении, в обоих направлениях [4]. Волоконные лазеры, как правило, генерирует излучения в диапазоне длин волн от 1,07 мкм до 1,09 мкм, при этом физические размеры активной среды для волоконных лазеров

сильно отличаются от размеров рабочего тела других типов лазеров. Так, если стержень Nd:YAG может быть длиной 200 мм, газоразрядная трубка CO<sub>2</sub> — лазера — длиной около 2 м, то усиливающее волокно в волоконном лазере, будет составлять десятки метров. Отражатели, используемые в волоконном лазере, тоже отличаются от тех, что используются в традиционных лазерах. В привычных традиционных

конструкциях обычно это зеркало, представляющее собой подложку с комбинацией диэлектрических покрытий, определяющих пропускание и длину волны излучения лазера. В волоконном же лазере используются встроенные дифракционные решетки, впечатанные в сердцевину волокна. Эти дифракционные решетки являются диспергирующими элементами, их работа описывается закономерностями Брэгга, поэтому они называются брэгговскими решетками (волоконные брэгговские решетки-ВБР) и представляют собой совокупность

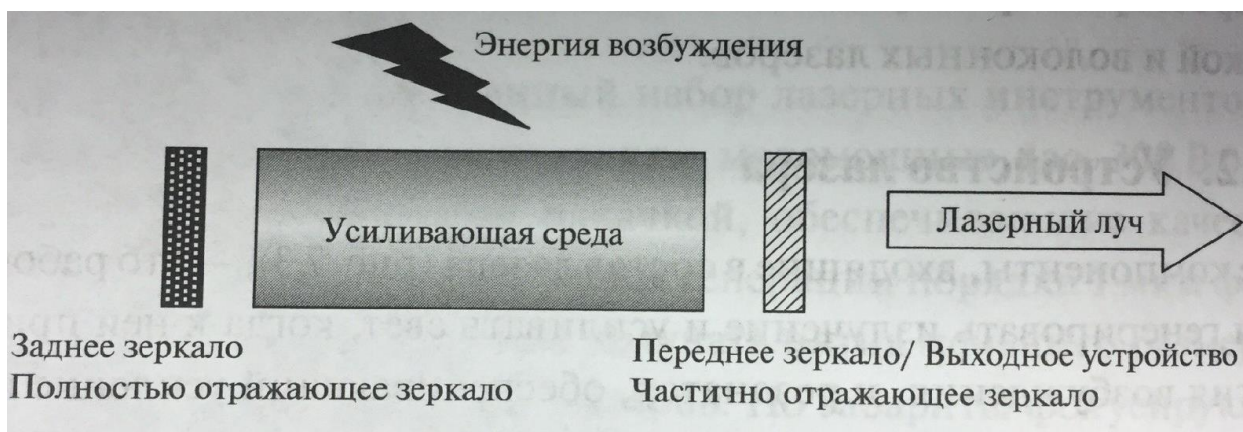


Рис.1 Основные компоненты лазера

периодических изменений показателя преломления. Период решетки определяет длину волны отраженного света, а изменение показателя преломления - величину отраженного света.

### 2.1.3. Nd:YAG-лазер

Nd:YAG-лазер-это твердотельный лазер (рис.2), его активная среда выполнена, как правило, в форме стержня, он излучает на длине волны 1,06 мкм [5]. Активными добавками являются ионы неодима, присутствующие в малых концентрациях в кристалле алюмоиттриевого граната YAG. И в непрерывном, и

в импульсных режимах выходная мощность лазера может быть получена при общей эффективности в диапазоне 3-5%. Благодаря своей эффективности, выходной мощности и надежности по сравнению с другими твердотельными лазерами этот лазер нашел широкое применение в промышленности. Nd:YAG-кристалл стержень получают, выращивая его по методу Чохральского [6] (затравочный кристалл медленно в течение нескольких дней вытягивают вверх от свободной поверхности объема расплава компонентов кристалла, находящегося в тигле). После извлечения из ростовой камеры Nd:YAG-кристалла(буля), у которого нет ни граней, ни ребер, ни выступающих вершин, из него делают, как правило, не один, а несколько лазерных стержней. Концентрация ионов неодима в буле тщательно контролируется и должна составлять не более 1,1%. Если попытаться и дальше увеличивать процентное содержание легирующих ионов Nd в матрице с целью дальнейшего усиления выходной мощности лазера, то в кристалле могут возникнуть недопустимые дислокации, присутствие которых, наоборот, вызовет существенное снижение мощности лазер.



Рис.2 Схема Nd:YAG-лазера

Лазерные стержни, как правило, составляют в диаметре 6 мм и 100 мм в длину, а самые большие стержни в промышленных лазерах достигают в диаметре 10 мм и имеют длину 200 мм. Из-за небольшого размера кристалла конструкции Nd:YAG-лазеров, как правило, гораздо более компактные, чем

СО<sub>2</sub>-лазеры. Основные элементы одностержневого Nd:YAG-лазера представлены на рис.2. Лазерная генерация достигается при оптическом возбуждении кристалла лампами, расположенными в непосредственной близости от него. Спектр излучения ламп — от 700 до 800 нм — перекрывает полосы поглощения Nd:YAG-кристалла. Для того, чтобы увеличить ввод света от ламп в стержень и соответственно влечь максимальную мощность на лазера, стержень и лампа заключают в специально спроектированные и изготовленные резонаторы. Такой узел называют квантроном. Двумя наиболее распространенными конфигурациями резонаторов являются эллиптические и близко связанные с ним формы. В случае эллиптического сечения стержень и лампа размещены вдоль двух фокусов, а в использования резонаторов с иной, близко связанной с эллиптической, формой лампы размещают близко друг к другу и к оси стержня. Внутренняя поверхность резонатора обычно покрыта золотом, что способствует максимальному взаимодействию света лампы со стержнем. Некоторые производители лазеров также делают керамические резонаторы, которые обеспечивают более равномерную накачку стержня, но при этом в сравнении с резонатором с золотым покрытием их эффективность снижена примерно на 5%.

Для накачки Nd:YAG-лазеров, излучающих в непрерывном режиме, наиболее широко используют дуговые лампы на криптоне, в то время как для импульсного режима используются лампы-вспышки, заполненные ксеноном при высоком давлении и криптоном. Срок службы ламп накачки определяет требование к длительности межремонтного интервала при обслуживании временных Nd:YAG-лазеров. Для дуговых ламп срок службы составляет от 400 до 1000 ч., в то время как для импульсных лазеров — от 20 до 30 миллионов импульсов в зависимости от условий работы.

Только часть излучаемого света поглощается кристаллом, остальная его часть рассеивается в виде тепла в резонаторе и для эффективной работы лазера должна быть удалена. Обычно это достигается путем охлаждения при пропускании деионизированной воды вокруг стержня и лампы в закрытом

контуре системы охлаждения, который соединен с теплообменником для эффективного отвода тепла.

Nd:YAG-лазеры характеризуются выходной мощностью в единицу времени, их различают как импульсные, непрерывные и лазеры, работающие в супермодулированном режиме [7,8,9]. Электропитание импульсных Nd:YAG-лазеров предназначено для получения высоких пиковых мощностей во время одного лазерного импульса, и в эти лазеры не имеют возможности работать в непрерывном режиме (CW) генерации излучения.

Импульсный режим (PW) подразумевает, что активная среда лазера возбуждается очень быстро в ответ на внешнее стимулирующее воздействие. Это позволяет лазеру передавать избыток энергии в течение короткого промежутка времени(как правило, порядка миллисекунд).

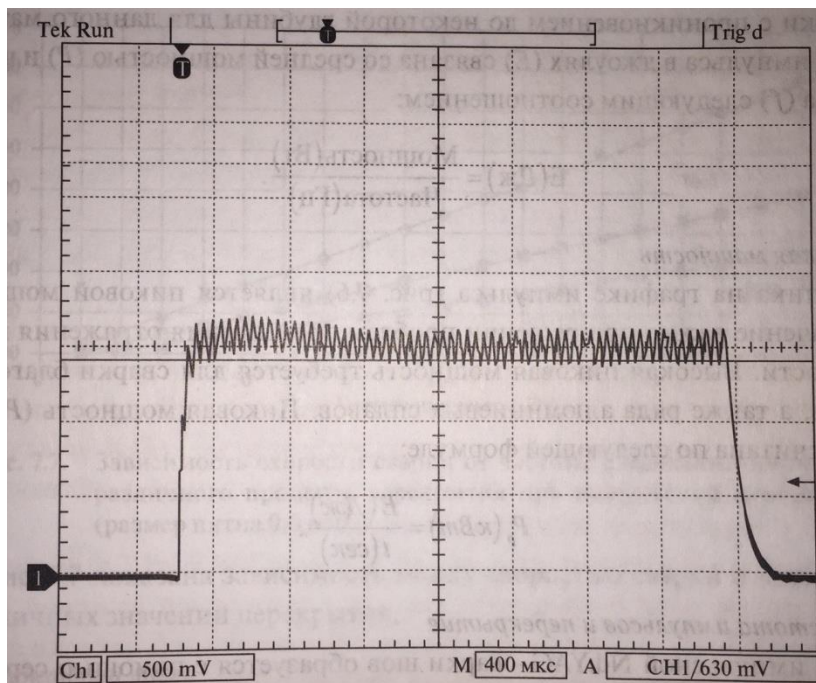


Рис.3 Основная временная форма лазерного импульса импульсного Nd:YAG-лазера

Пиковая мощность импульса для импульсных Nd:YAG-лазеров может быть выше раз в 30 максимальной величины средней мощности. Это позволяет лазерам с низкой и средней мощностью достигать в импульсе энергии достаточной, чтобы нагреть обрабатываемые материалы до температур испарения. Базовый лазерный импульс имеет прямоугольную форму (рис.3). Для

задач микросварки стандартных ферросплавов без покрытия или для микрорезки достаточно использовать лазерный импульс такой формы. Тем не менее, при сварке большинства отражающих или разнородных материалов результат сварки зависит от формы импульса [10]. Если большинство лазеров непрерывного излучения оценивают по параметрам их излучения, то при оценке импульсных лазеров необходимо учитывать энергию импульса, пиковую мощность, длительность импульса в частоту.

#### Энергия импульса

Объем ванны расплава для каждого импульса определяется энергией, вносимой импульсом. Существует минимальная энергия импульса, необходимая для сварки с проникновением до некоторой глубины для данного материала. Энергия импульса в джоулях ( $E$ ) связана со средней мощностью ( $P$ ) и частотой импульса ( $f$ ) следующим соотношением [11]:

$$E(\text{Дж}) = \frac{\text{Мощность}(\text{Вт})}{\text{Частота}(\text{Гц})}$$

#### Пиковая мощность

Высота пика на графике импульса (рис.4) является пиковой мощностью, и это значение важно при решении проблем преодоления отражения и теплопроводности. Высокая пиковая мощность требуется для сварки благородных металлов, а также ряда алюминиевых сплавов. Пиковая мощность ( $P_p$ ) может быть рассчитана по следующей формуле [11]:

$$P_p(\text{kВт}) = \frac{E(\text{Дж})}{t(\text{сек})}$$

#### Частота импульсов и перекрытие

Во время импульсной Nd:YAG-сварки шов образуется с помощью серии сварных точек. Частота генерации импульсов лазера определяет скорость шовной сварки. Если стоит задача получить герметичные швы, то необходимо согласовать частоту импульса ( $f$ ), диаметр пятна( $d$ ) и скорость сварки( $v$ ) между собой, чтобы достичь требуемый процент перекрытия(% overlap-% OL). Вообще говоря, типичные значения для герметичных швов составляет от 70 до 80% OL.,

а для негерметичных сварных швов от 50 до 60% OL. Процент перекрытия может быть вычислен следующим образом [11]:

$$\%OL = 100\% \frac{[d - \frac{v}{f}]}{d}.$$



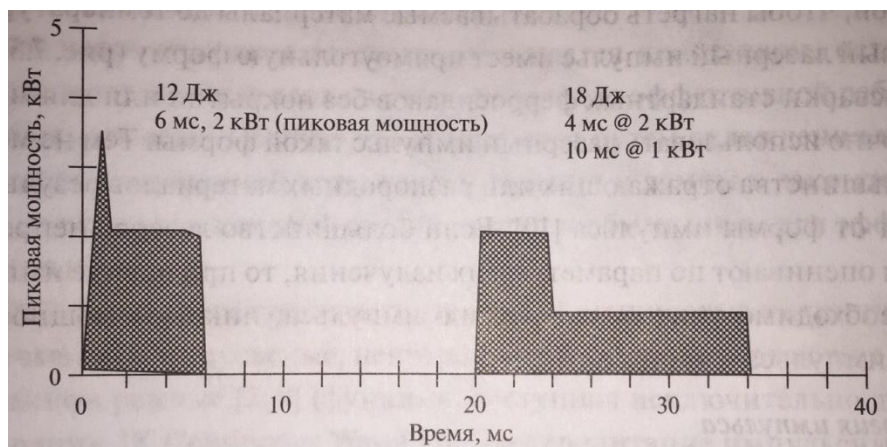


Рис.4 Типовой импульс излучения импульсного Nd:YAG-лазера с начальным выбросом в виде пика

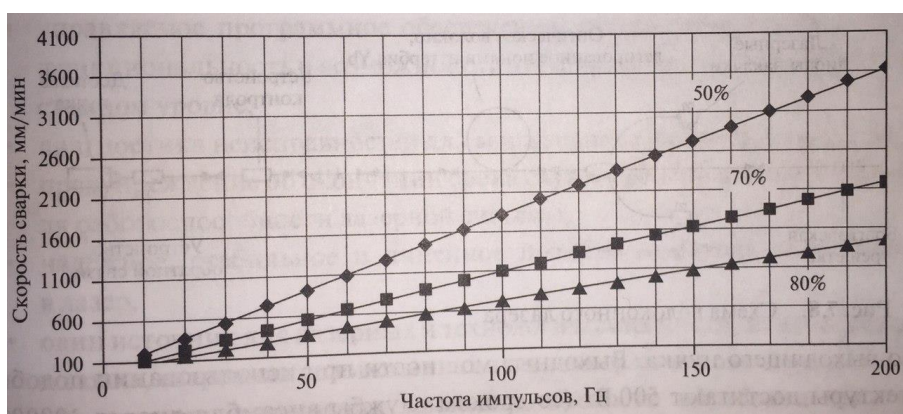


Рис.5 Зависимость скорости сварки от частоты следования импульсов для различного процента перекрытия при импульсной лазерной сварке(размер пятна 0,6 мм)

На рис.5 показана зависимость между скоростью сварки и частотой для трех различных значений перекрытия.

#### Волоконный лазер

Волоконные лазеры с низкой мощностью обладают компактностью и надежностью, а также имеют ряд достоинств, которые выделяют их на фоне Nd:YAG-лазеров с ламповой накачкой. У волоконных лазеров явное преимущество с точки зрения качества пучка и степени преобразования электрической энергии в оптическую составляет около 25% [11,12]. Текущие исследования [13,14] показали, что одномодовый волоконный лазер является эффективным, надежным и компактным инструментом для микрорезки, микросварки и микробурения. Технология диодной накачки снижает

эксплуатационные расходы и обеспечивает высокую эффективность преобразования. Теоретически можно достичь более 80% при преобразовании света накачки в свет излучения [15], но на практике для иттербиевых волоконных лазеров с двойной оболочкой оптическая эффективность преобразований составляет 60-70% [16]. При использовании воздушного охлаждения можно получить средние уровни мощности до 500 Вт. Поскольку общая эффективность высока, то большинство волоконных лазеров работает при стандартных напряжениях 110 В/230 В.

В конструкции прочной и надежной волоконной лазерной системы всего несколько основных волоконных компонентов, ее преимущества подробно обсуждены в работе [17]. Отметим два самых главных из них-отсутствие необходимости оптической юстировки и защиты открытых оптических поверхностей. Главными среди основных компонентов волоконных лазеров являются система диодов накачки и отражатель в виде решеток Брэгга. На рис.6 показана схема конструкции резонатора волоконного лазера. Выходящее волокно имеет одномодовую сердцевину с диаметром менее 10 мкм, что обеспечивает высокое качество выходного пучка.

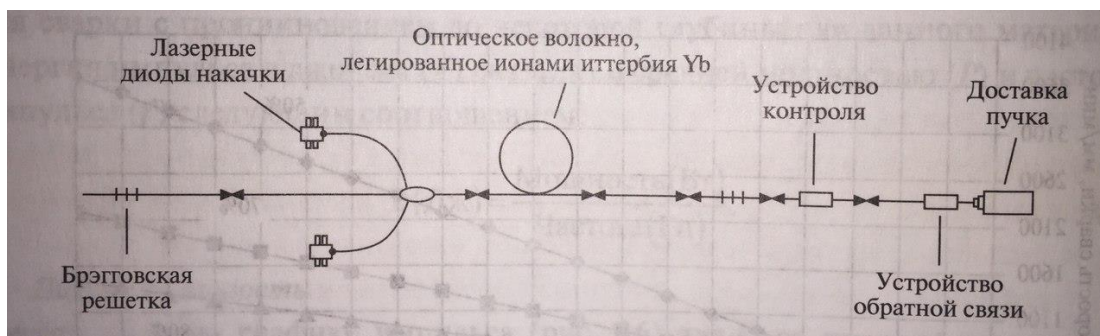


Рис.6 Схема волоконного лазера

Выходные мощности при использовании подобной архитектуры достигают 500 Вт (со сроком службы диодов 100000 ч. в конфигурации с радиатором водяного охлаждения) и – 120 Вт (с использованием усиленного воздушного охлаждения при температуре окружающего воздуха до 35° С и с таким же уровнем надежности диодов).

Лазерные диоды накачки занимают центральное место в вопросах обеспечения надежности и производительности волоконной лазерной системы. За последний десяток лет многомодовые диодные источники накачки с высокой выходной мощностью в диапазоне длин волн 900-980 нм и превратились в коммерчески доступные компоненты. Некоторые из этих источников имеют очень высокий уровень надежности, при этом среднее время их безотказной работы составляет более 500000 ч. при соблюдении нормальных условий эксплуатации. Включив в схему соответствующий уровень резервирования ансамбля таких источников накачки со средним временем безотказной работы (MTBF) более 100000 ч., можно построить волоконные лазеры с выходной мощностью в несколько сотен ватт.

Подведем итоги рассмотрения преимуществ волоконного лазера, которые превращают его в удобный инструмент для промышленного использования.

Преимущества существующих волоконных лазеров:

- надёжность и долговечность;
- высокая стабильность выходной мощности лазера приводит к стабильности обработки;
- небольшие габариты всего блока;
- высокая гарантия безотказной работы (выше, чем для традиционных лазеров);
- достижимая выходная мощность – несколько сотен ватт при использовании возможностей воздушного или водяного охлаждения;
- цена – более низкая, чем у традиционных лазеров с аналогичной мощностью.

Преимущества новых промышленных волоконных лазеров:

- встроенная защита от повреждения при обратном отражении;
- управляемое программное обеспечение, которое обеспечивает полную функциональность и возможность интегрирования в контроллеры на системном уровне;
- диагностика неисправностей для мониторинга работоспособности;
- предупреждение об окончании срока службы работы диодов для контроля работоспособности лазерной системы;

- надёжное, стабильное и линейное питание монитора интегрировано в лазер,
- один источник для лазерных и технологических инструментов (режущая головка, сварочная головка или гальванометр на основе сканеров);
- возможность повышения производительности обработка светоотражающих материалов через периодические улучшения лазерной пиковой мощности.

## 2.2. Доставка пучка

С точки зрения лазерной микросварки сам по себе лазер без дополнительного оптического и механического оборудования бесполезен. Чтобы использовать его для сварки материалов, он должен быть встроен в функциональный блок, которые состоит из трёх ключевых элементов:

- лазерный источник (Nd:YAG – или волоконный лазер);
- система доставки пучка (доставка по волокну) и фокусирующая оптика;
- многоосная система движения с числовым программным управлением или сканирующая головка.

### 2.2.1 Доставка по волокну

Для доставки излучения промышленных лазеров с длиной волны 1,06 мкм используются волокна со ступенчатым профилем показателя преломления. Материал их сердцевины имеет высокий показатель преломления, а окружающая ее оболочка – более низкий показатель преломления (рис.7). Распространение света по волноводу происходит за счет полного внутреннего отражения на границе раздела сердцевина/оболочка, возникающего из-за разницы показателей преломления. Особенность этих волокон в том, что интенсивность выходящего излучения равномерно распределена по сечению пучка. В зависимости от мощности лазера диаметры волокон могут меняться в диапазоне от 100 до 600 мкм для передачи излучения импульсного Nd:YAG – лазера и от 10 до 20 мкм – для одномодового волоконного лазера. Волокна изготовлены из высокочистого плавленого кварцевого стекла, и поэтому потери излучения минимальны.

Угол, под которым лазерный луч вводят в волокно, должен быть таковым, чтобы после преломления луча на торце сердцевины он бы образовал с осью

волокна угол, меньший некоторого критического угла. Тогда, многократно отражаясь на границе между сердцевиной и оболочкой, луч света будет направляться по волокну

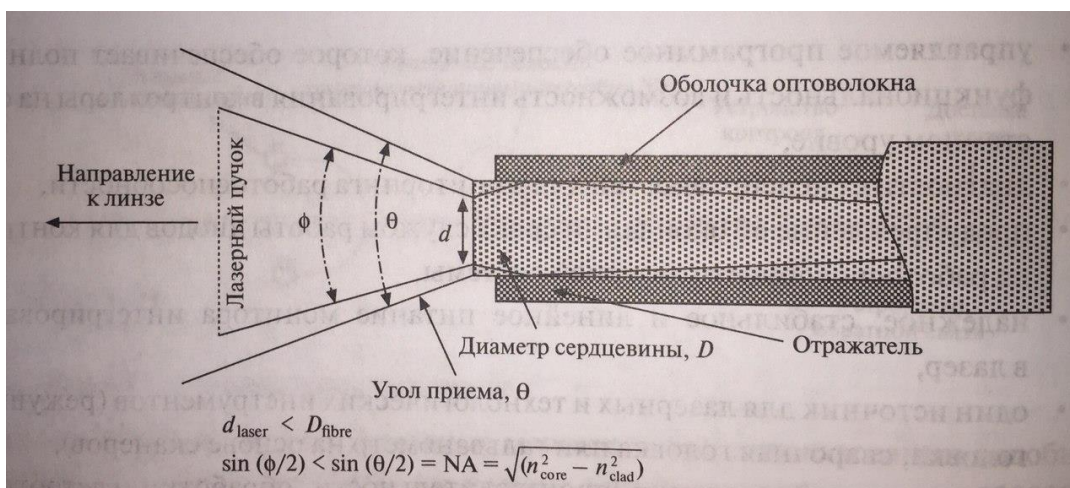


Рис.7 Распространение лазерного луча в оптическом волокне

согласно закону полного внутреннего отражения, при этом диаметр сфокусированного на поверхности детали пятна будет меньше или равен диаметру сердцевины волокна. Размер сфокусированного пятна в промышленных системах, как правило, составляет 80-90% от диаметра сердцевины, что облегчает регулировку волокна и любое изменение диаметра пятна за счёт лазерных параметров [18]. Кроме того, расходимость входного лазерного луча должна быть меньше, чем угол приёма волокна (угол определяется числовой апертурой NA волокна). Входная угловая апертура волокна NA является ключевым параметром для ввода-вывода излучения.

Другой важный вопрос – доставка выходного пучка лазера к заготовке. Система доставки излучения волоконного лазера должна иметь защиту торца волокна от повреждений, вызываемых загрязнением и обратно отражённым от заготовки светом. GSI Group Laser Division производит волокна с концевой заделкой, обрабатывающие и сканирующие головки для микросварки [19], которые кроме формирования пучка высокого качества обеспечивают обзор процесса «сквозь линзу».

## 2.2.2 Сканирующие головки

Лазерная микросварка со сканирующей головкой придает процессу значительные преимущества перед обычной инструментальной обработкой. В зависимости от движений гальванических зеркал относительно друг друга можно просканировать области обработки материалов площадью от долей до нескольких единиц квадратных метров. Это достигается при скорости сканирования несколько метров в миллисекунду и значительно сокращает время рабочего цикла обработки и, соответственно, увеличивает производительность процесса. В большинстве сварочных работ среднее время сварки – это 20-50% от времени всего рабочего цикла. Заметим, что это относительно короткий период по сравнению с длительностью периодов загрузки обрабатываемой детали и её позиционированием. Использование сканирующей головки позволяет снизить время межоперационных действий в течение всего производственного процесса, тогда время непосредственно самого процесса сварки можно увеличить до 90% и более. Кроме того, лазерная сварка обладает структурными преимуществами перед обычной точечной и полуавтоматической сваркой: можно с помощью программы управления сканирующими зеркалами запрограммировать форму сварного шва в различных геометрических фигурах – окружность, синусоида, открытый круг и спираль. Компания GSI является лидером в области производства сканеров и лазеров [19]. Она разработала свой собственный сканер и программное обеспечение (ПО) LaserViewSE™, интегрированное в производство обработки материалов лазером, ПО позволяет управлять всеми функциями лазера и сканирующих головок. На рис.8 показана сканирующая головка, снабженная волокном доставки от лазера.

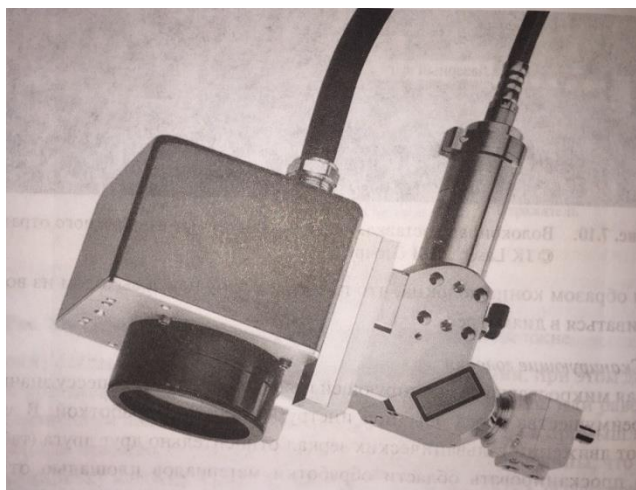


Рис.8 Считывающая головка снабжена волокном, доставляющим лазерное излучение

### 2.2.3. Лазерная производительность

Режим, при котором становится заметной разница между производительностью YAG-лазера с ламповой накачкой, способны производить длинные, мультимикросекундные импульсы с пиковой мощностью во много раз превышающие среднюю мощность лазера при условии, что рабочий цикл будет достаточно медленным. Эта способность вытекает из самой лампы-вспышки, которая в большей степени ограничена максимальной средней тепловой нагрузкой, чем пиковой выходной мощностью. Импульсные Nd:YAG-лазеры используют электродрайверы, предназначенные для создания высокой пиковой мощности во время лазерного импульса, и лишены возможности работать в непрерывном режиме. Эти лазеры хорошо подходят для сварки высокоотражающих материалов. Высокая пиковая мощность преодолевает теплопроводность и отражательную способность драгоценных металлов, медных и алюминиевых сплавов. Некоторые материалы, так называемые высокоуглеродистые стали, литиевые сплавы и ряд алюминиевых сплавов, являются тяжёлыми для задач сваривания. Эти материалы, как правило, либо трескаются, либо образуют сварные швы с порами или другими дефектами. Но если изменить форму лазерного импульса [20], то в этих материалах можно создать соединения с бездефектными сварными швами. Базовая форма лазерного импульса – прямоугольный импульс, он подходит для микросварки большинства

черных металлов, не имеющих какого-либо покрытия или плакирования. Для сплавов, чувствительных к трещинам, для сварки разнородных материалов или материалов с покрытием используется иная форма импульса, или так называемый режим снижения (ramp-down) [20].

Полупроводниковые лазерные диоды, используемые для накачки волоконного лазера, могут быть промодулированы on-off в широком диапазоне частот, как показано на рис.9 (от постоянного тока до десятков килогерц в большинстве промышленных применений).

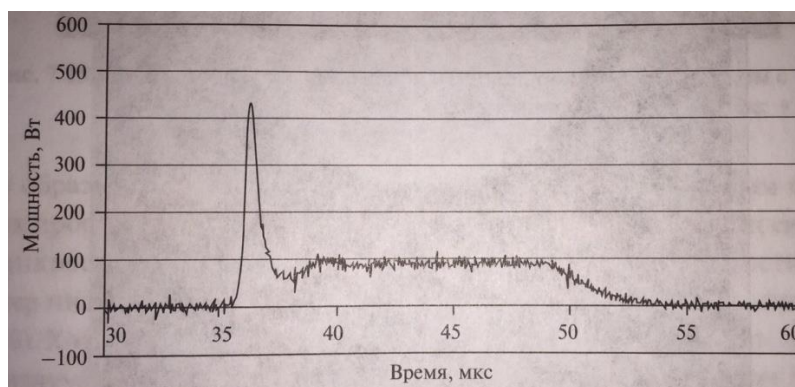


Рис.9 Типичная форма выходного сигнала с ослаблением импульса при переключении одномодового волоконного лазера on-off

Несмотря на это ими, как правило, нельзя управлять в течение длительных периодов (мультимикросекунд), также как лампами-вспышками (конечно, если не стремиться снизить их срок службы до недопустимого уровня).

### 2.3. Профили пучка

Помимо различных временных форм импульсов, генерируемых обоими лазерами, существует ещё один фактор, который необходимо учитывать при выборе лазера для микросварки, - это профиль распределения энергии в сечении лазерного пучка. Профиль луча лазера может повлиять на производительность сварки, т.е. на глубину проникновения сварного шва, профиль шва и качество сварки. Плосковершинный профиль пучка для Nd:YAG-лазеров с накачкой импульсными лампами оказывается более приемлемым для сварки, так как мощность и энергия распределяются равномерно по всей зоне сварки. Плосковершинное распределение энергии достигается в том случае, когда лазерный луч доставляется к заготовке с помощью волоконно-оптического



кабеля. Увеличение энергии импульса увеличивает глубину шва. Испарение не происходит, если плотность мощности/энергии остаётся ниже точки испарения.

Профиль пучка одномодового волоконного лазера является гауссовым (рис.10). Это способствует образованию очень глубоких и узких швов (рис.11). Для сварки внахлест эта форма шва не очень хорошо, потому что с точки зрения механических свойств граница контакта окажется малой по сравнению с той, которая образуется при использовании пучка с плосковершинным профилем. Оба этих профиля пучка, каждый по-своему, могут обеспечить преимущества в ходе микросварки. Но если есть возможность, то надо приобрести волоконный лазер низкой мощности 100-500 Вт с плосковершинным профилем пучка. Хотя, если далее вы будете использовать волоконный кабель для доставки излучения, это приведет к снижению качества пучка за счёт появления дополнительных мод волокна.

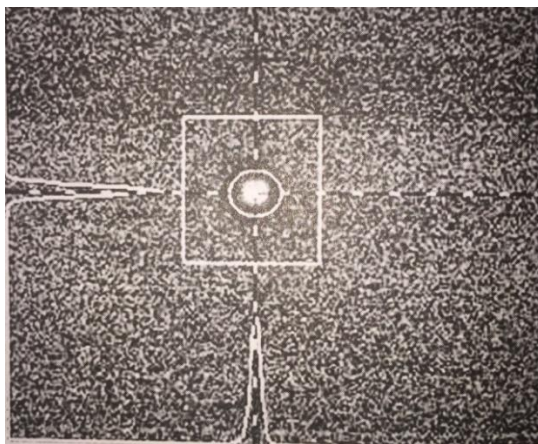


Рис.10 Профиль пучка одномодового волоконного лазера(распределение Гаусса):диаметр волокна 10-12 мкм



Рис.11 Поперечное сечение сварного шва, полученного пучком с гауссовым профилем: средняя мощность 100 Вт

#### 2.4. Сравнение Nd:YAG-лазера и волоконного лазера

Рассмотрим различные режимы работы для двух типов лазеров, учитывая разницу в качестве пучка и частоте импульсов, существующую между двумя типами лазеров. YAG-лазер с ламповой накачкой характеризуется длинными высоко-энергетическими импульсами, но более низким качеством пучка. Волоконный лазер связан с высокой частотой повторения, тип модуляции on-off, одномодовое качество луча, но низкая энергия импульса. С точки зрения приложений микросварки оба эти режима имеют свои преимущества, и некоторые примеры их применений будут описаны ниже в разд. 4.

### 3. Процесс лазерной микросварки

#### 3.1. Режимы сварки

Теплопередача и поток расплавленного металла, характерные для процесса лазерной и микросварки, могут существенно повлиять на геометрию сварочной ванны, структуру затвердевания [21, 22] и привести к образованию дефектов [23]. Лазерная микросварка представляет собой процесс, при котором металл расплавляется и соединяется при их нагревании сфокусированным лазерным лучом.

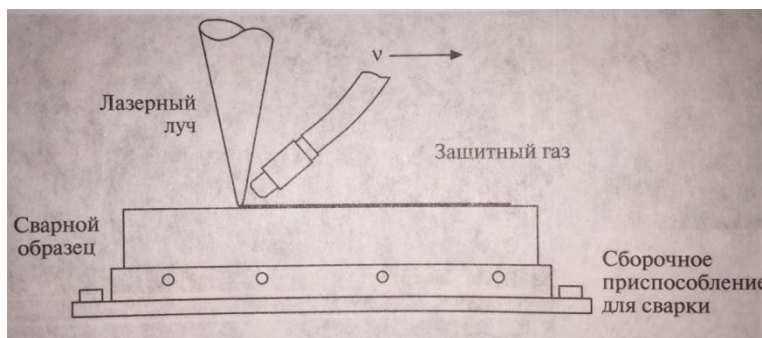


Рис.12 Схема лазерной сварки, защитный газ предотвращает окисление поверхности в процессе сварки

На рис.12 показана схема установки для лазерной сварки. Фокусировка пучка используется для того, чтобы при заданной мощности лазера и скорости сварки расплавить заготовку или материалы, подготовленные для соединения. Защитный газ, а обычно в качестве его используется инертный газ, подается для защиты сварочной ванны от окисления (сопло устанавливается либо соосно лучу, либо сбоку). Некоторые характерные черты лазерной микросварки придают ей привлекательность, превращая ее в альтернативу другим видам микросварки (контактной микросварке или другой микросварке):

- точные, узкие и глубоки швы, которые могут быть выполнены с высоким металлургическим качеством;
- небольшая зона термического воздействия, что уменьшает металлургическое повреждение, а также позволяет создавать сварные швы вблизи от соседних термочувствительных деталей изделия;

- низкая подача тепла в материал устраняет необходимость в сложной отсадке и позволяет без искажений сваривать толстые и тонкие секции;
- высокая скорость процесса (скорость сварки свыше 10 м/мин может быть достигнута в материалах толщиной около 1 мм);
- гибкость организации процесса: излучение от одного лазера может быть распределено между целым рядом рабочих станций;
- Сварные швы могут быть выполнены при соединении элементов из разнородных и разнотолщинных материалов со сложной геометрией.

Лазерная микросварка металлов классифицируется двумя режимами сварки: режим проводимости и режим с образованием канала проплавления (иногда этот режим называют сваркой с глубоким проплавлением) [24, 25]. Мощность лазерного луча и размер сфокусированного пятна относительно заготовки будут определять режим сварки.

Некоторые ограничения на использование микросварки в режиме проводимости возникают в случае, если лазерный луч не сфокусирован и плотность мощности оказывается недостаточной для того, чтобы при данной скорости сварки вызвать кипение (рис.13).

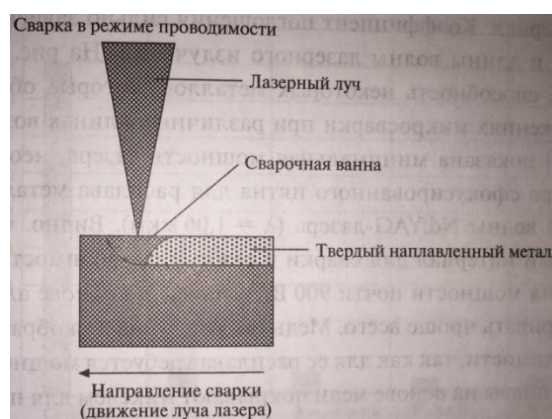


Рис.13 Основы лазерной сварки в режиме проводимости

В этом режиме сварка может вестись или лазером, работающим в импульсном режиме (PW), путём перекрытия точек, или лазером, работающим в непрерывном режиме (CW). Энергия излучения поглощается поверхностью материала, и объём под поверхностью нагревается за счёт теплопроводности.

Можно оценить минимальную мощность лазера, необходимую для расплавления поверхности материала, с помощью простого уравнения [26]. Когда стационарный гауссов пучок взаимодействует с поверхностью материала, зависимость распределения температуры от мгновенного точечного источника в полубесконечном теле в зависимости от времени  $T(t)$  определяется по формуле [27]:

$$T(t) = \frac{2AW}{3\pi} \tan^{-1} \left[ \frac{4}{d} \sqrt{\alpha t} \right],$$

где  $d$  – диаметр сфокусированного лазерного пятна,  $W$  – мощность лазера,  $A$  – поглощательная способность поверхности,  $K$  – теплопроводность и  $\alpha$  – коэффициент тепловой диффузии. Таким образом, минимальная мощность лазера необходимая, чтобы расплавить металл до температуры расплава  $T_m$ , определяется по формуле:

$$W_m = \frac{\sqrt{\pi K d T_m}}{A}.$$

Одним из наиболее важных параметров, влияющих на эффект взаимодействия лазерного излучения с материалом, является коэффициент поглощения материалом лазерного излучения, и этот коэффициент в значительной степени зависит от длины волны и температуры [28]. Когда лазерный луч попадает на материал мишени, часть энергии отражается, другая часть поглощается и нагревает материал. Коэффициент поглощения сильно зависит от облучаемого материала и длины волны лазерного излучения. На рис.14 показана поглощательная способность некоторых металлов, которые обычно используются в приложениях микросварки при различных длинах волн лазера [28]. На рис.15 [26] показана минимальная мощность лазера, необходимая при заданном размере сфокусированного пятна для расплава металлов и микросварке с длиной волны Nd:YAG-лазера ( $\lambda = 1,06$  мкм). Видно, что серебро – наиболее трудный материал для сварки в режиме проводимости, требующий

для расплавления мощности почти 900 Вт. Сплавы на основе алюминия, стали и никеля сваривать проще всего. Медь также трудна для обработки сваркой в режиме проводимости, так как для ее расплава требуется мощность примерно 300 Вт.

При сварке в режиме образования парогазового канала или режиме глубокого проплавления (рис.16) поверхность металла нагревается с помощью сфокусированного лазерного луча (в пятне повышенная плотность мощности) до температуры, когда испарение поверхности создает достаточное давление отдачи паров, чтобы вдавить поверхность расплава в полость или небольшой канал. Канал увеличивается в глубину из-за повышенного влияния излучения на заготовку через многократные отражения лазерного луча от стенок канала – и материал испаряется [25, 29, 30]. Баланс между гидростатическими силами жидкого металла вокруг канала управляет его динамикой, давление испарения, ионизируемой плазмой внутри него.

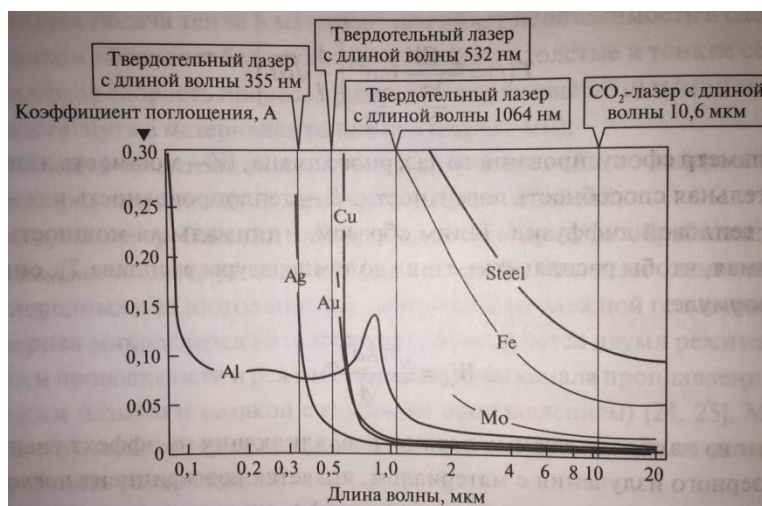


Рис.14 График зависимости коэффициента поглощения от длины волны для различных металлов и источников лазерного излучения

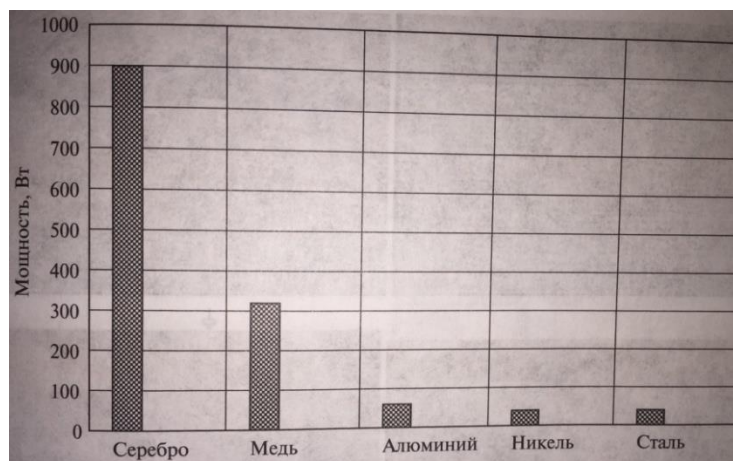


Рис.15 Минимальная мощность лазерного, необходимая для расплава различных металлов импульсным Nd:YAG-лазером[26]

На рис.17 проиллюстрированы эволюция формы сварного шва и изменение глубины шва при изменении плотности мощности на заготовке (сварные швы были выполнены в пластине из нержавеющей стали одномодовым волоконным лазером мощностью 400 Вт) [31]. На фотографиях видно, как при увеличении плотности мощности меняется режим сварки, переходя с режима проводимости в режим образования парогазового канала. Во время этих испытаний скорость сварки поддерживалась постоянной на уровне 9 м /мин.

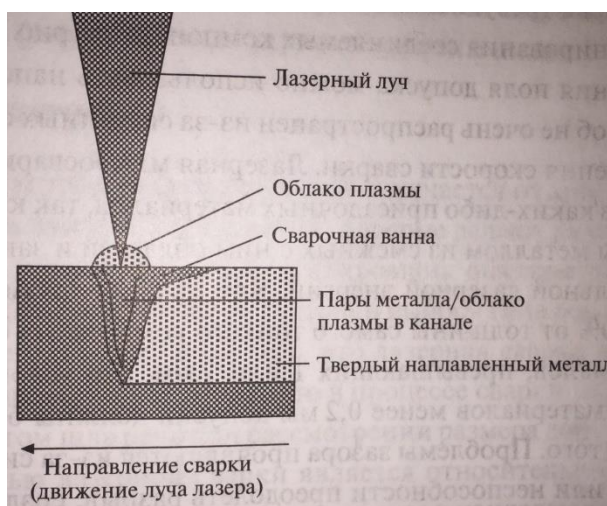


Рис.16 Основы лазерной сварки в режиме канала или глубокого проплавления

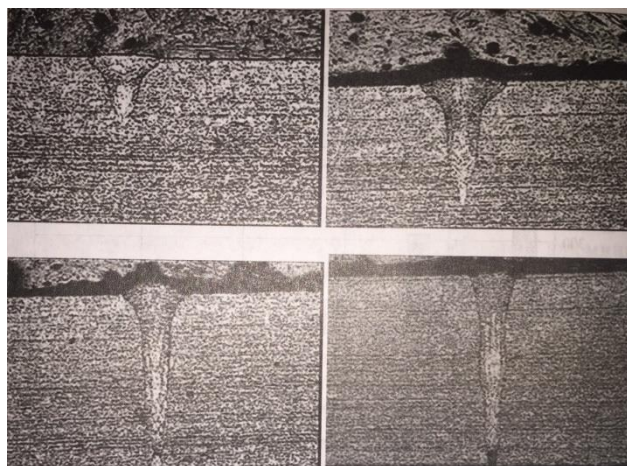


Рис.17 Сварные швы, выполненные одномодовым волоконным лазером мощностью 400 Вт (JK400FL); нержавеющая сталь марки 304SS, скорость сварки 9 м/мин; защитный газ-аргон: а-4,98 МВт/см<sup>2</sup>;  
б-5,98МВт/см<sup>2</sup>; в-6,98 МВт/см<sup>2</sup>; г-7,98 МВт/см<sup>2</sup>

### 3.2 Сварные швы

При решении использовать лазерную микросварку следует рассмотреть конструкцию соединения и способ изготовления всего изделия в целом, чтобы оценить максимальную потенциальную выгоду от применения этого процесса. Лазерная микросварка требует высокоточного контроля допусков зазора и совместного позиционирования соединяемых компонентов (рис.18). В макросварке для расширения поля допуска можно использовать наполнитель, но на практике этот способ не очень распространен из-за связанных с этим расходов, а также из-за снижения скорости сварки. Лазерная микросварка, как правило, осуществляется без каких-либо присадочных материалов, так как зазоры должны быть заполнены металлом из смежных с ним областей и заполнение зазора требует дополнительной лазерной энергии. Как правило, размер зазора допускается не более 10% от толщины самого тонкого компонента сварки. Для более толстых материалов, превышающих 1 или 2 мм, это условие может быть ослаблено, но для материалов менее 0,2 мм допуски должны быть сокращены до 5% и даже более того. Проблемы зазора проявляются из-за сильной вогнутости сварных швов или неспособности преодолеть разрыв, создаваемый между соединяемыми частями. Кроме того, гораздо труднее начать



лазерную сварку в зоне большого зазора по сравнению с созданием швов в коротких отрезках, выпячивающихся в зазор.

В дополнение к необходимости подготовки и выравнивания соединяемых поверхностей они должны быть очищены от таких загрязняющих веществ, как жир, краска, грязь и оксиды. Остатки от химического обезжиривания и чистящих средств должны быть тщательно удалены, так как из-за наличия этих веществ могут образовываться сварочные брызги и возникать пористость (эти проблемы будут рассмотрены ниже).

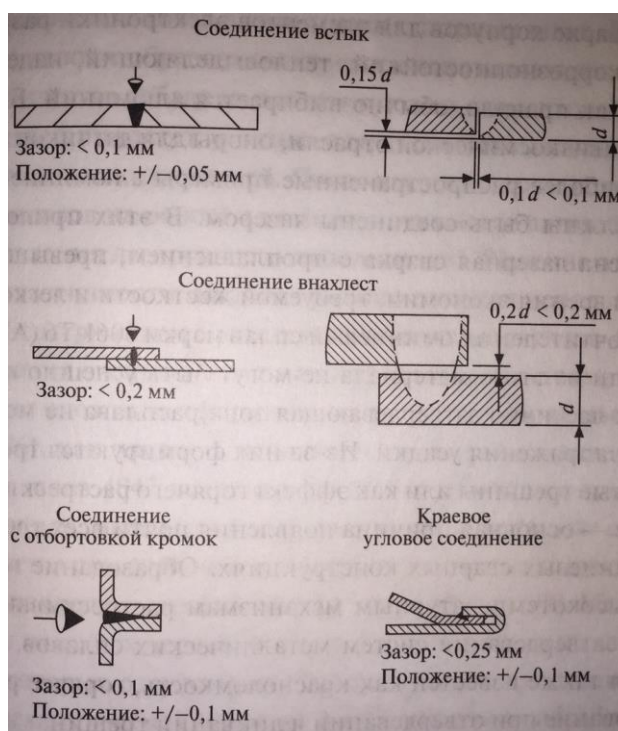


Рис.18 Максимальный зазор и позиционные допуски для разных сварных соединений

### 3.3. Материалы

Металлургия лазерной сварки не сильно отличается от других методов сварки, но есть две очень важные особенности, которые делают лазерную микросварку очень сложной, и инженер или проектировщик обязаны знать о них прежде, чем приступят к разработке конструкции и выбору типа соединяемых материалов. Прежде всего, следует отметить, что лазерная сварка почти всегда – это автогенный процесс, это означает, что в процессе сварки металл не

добавляется. Именно об этом шла речь при рассмотрении размера допуска к зазорам. Второй особенностью лазерной сварки является относительно высокая скорость охлаждения затвердевающего металла, которая накладывает некоторые ограничения на выбор металла.

Нержавеющую сталь с ее отличной коррозионной стойкостью и хорошими металлургическими характеристиками используют во многих приложениях микросварки. Нержавеющая сталь немного трудна и чуть дороже в обработке, чем алюминий. В сварке некоторых корпусов блоков для аэрокосмической отрасли используют нержавеющую сталь, но главным образом она используется в армии, в медицинской сфере или в автомобильной промышленности. Установлены различные типы нержавеющей стали и разработаны методические рекомендации для проведения процессов сварки компонентов из этих материалов при изготовлении технических устройств. Это касается режимов сварки, учитывающих механические свойства материалов и направленных на предотвращение появления коррозии, окисления или внесения дефектов в сварной шов. Уникальные свойства нержавеющей стали связаны с эффектом добавления к стали легирующих элементов, в основе хрома и никеля. Как правило, для производства нержавеющей стали необходимо более чем 12-13% хрома.

#### Аустенитные нержавеющие стали

Эти стали, обычно называемые «стали серии 300», как правило, подходят для лазерной микросварки. По сравнению с низкоуглеродистыми сталями для них достигнуто увеличение скорости сварки, и из-за более низкой теплопроводности заметно небольшое увеличение глубины проникновения шва (рис.19) [32]. Высокие скорости лазерной сварки также являются преимуществом в снижении восприимчивости к коррозии, вызванной выпадением карбидов хрома на границах зерен, что может произойти при высоком тепловом подводе в процессе сварки. Кроме того, лазерная сварка сталей этих сортов приводит к меньшей тепловой деформации и остаточным напряжениям по сравнению с традиционными методами сварки, так как тепловое

расширение этих сталей на 50% выше, чем у простых углеродистых сталей. Следует избегать использования сталей легкообрабатываемых классов, поскольку эти стали обладают высоким содержанием серы и фосфора, что может привести к образованию горячих трещин.

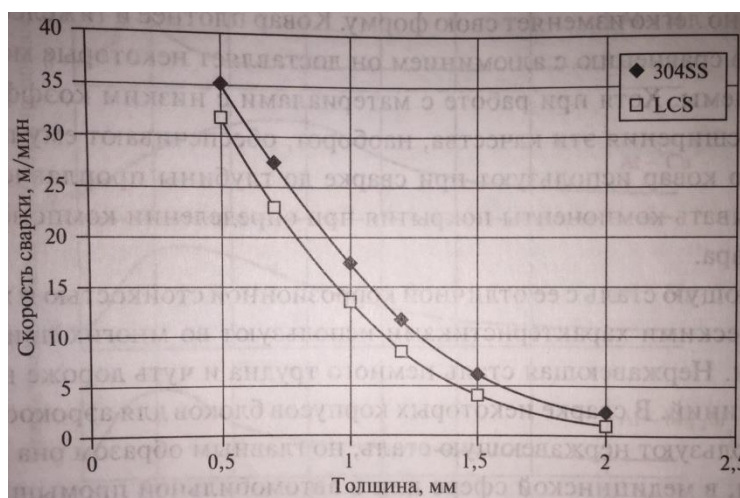


Рис.19 Характеристика сварки нержавеющей стали 304 и низкоуглеродистой стали. Швы сделаны одномодовым волоконным лазером мощностью 400 Вт (JK400L), размер пятна 30 мкм [32]

#### Ферритные и мартенситные нержавеющие стали

Эти стали 400 серии, они не обладают хорошей всесторонней свариваемостью, как аустенитные сорта стали. Лазерная сварка ферритных сталей в некоторых случаях препятствует совместной прочности и устойчивости к коррозии. Уменьшение прочности должно быть представлено как образование грубых зерен в зоне термического воздействия и формирование мартенсита, который происходит при высоком содержании углерода. Зона термического воздействия может иметь высокую твердость благодаря высокой скорости охлаждения. Предварительный подогрев может снизить образование мартенсита в сплавах 400 серии. Некоторые сплавы 400 серии могут быть сварены с хорошим качеством со сплавами 300 серии, но опять же результаты обладают низкой воспроизводимостью, могут варьироваться от партии к партии или при изменении количества подводимого тепла.

## 4. Дефекты и оценка микросварных соединений

### 4.1. Дефекты сварки

Дефекты сварки, такие как пористость, непровар, брызги, сквозные прогары, окисление и различные формы трещин, могут образоваться во время лазерной микросварки, или из-за проблем, связанных с использованием материалов (они указаны в разд.3.3), или во время процесса сварки.

#### Образование трещин в шве

Существует целый ряд механизмов трещинообразования, связанных со сваркой металлических сплавов. Один из наиболее известных – это водородное растрескивание, также называемое холодным растрескиванием. Водородное растрескивание часто является причиной серьезной проблемы при сварке углеродистых сталей и высокопрочных низколегированных сталей. Однако при сварке алюминиевых сплавов водородного растрескивания не происходит. Горячее растрескивание – причина появления почти всех трещин в алюминиевых сварных конструкциях. Горячее растрескивание подчиняется механизму высокотемпературного растрескивания и, в основном, определяется функцией отвердевания системы металлических сплавов. Этот механизм растрескивания также известен как красноломкость, горячее образование сетки мелких трещин, отвердевание и ликвидация трещин. Механизмы трещинообразования, которые могут возникнуть во время лазерной сварки, в целом можно устранить путем оптимизации технологических параметров и крепежной оснасткой. Однако сочетание креплений и конфигурации сварного шва часто приводит к возникновению геометрических дефектов, что вызвано локализацией высокой концентрации напряжений, и это также может вызвать рост трещин.

#### Подрезы

Подрезы, или подплывы сварного шва в микросварке вызваны двумя основными механизмами обработки. Первый механизм связан с высокой мощностью лазера, она приводит к выталкиванию жидкого материала из сварочной ванны и его потере (рис.20) от разбрызгивания и испарения [33]. Тем не менее, потеря материала через разбрызгивание происходит только при

высокой мощности лазера. Более приемлемым критерием следует считать мощность лазера, поделенную на скорость сварки, которая регулирует подачу тепла и динамику потока энергии через канал [34]. Другой тип дефекта подреза наблюдается в случае, когда зазор оказывается слишком большим при сварке внахлест или при сварке встык. Этот дефект может быть предотвращен за счет уменьшения зазора одновременно с хорошим фиксированием/зажимом.



Рис.20 Подрез, или сварочный продув вызван слишком большой мощностью/энергией на заготовке, что приводит к испарению материала

#### Сварочные брызги и пористость

Сварочные брызги определяются как расплавленные капли металла, которые возникают в зоне сварки. Процесс формирования брызг можно контролировать за счет уменьшения пиковой мощности и снижения температуры сварки. Тем не менее, не следует забывать, что изменение параметров пиковой мощности может привести к уменьшению глубины проникновения и соответственно к ослаблению сварного шва.

Быстрое закрытие канала предотвращает полное проникновение луча через пластину и может привести к образованию пористости. При быстром охлаждении (обычно соответствующем лазерной сварке) в сварном шве остаются поры, когда быстро затвердевающая сварочная ванна захватывает поры прежде, чем пузыри смогут подняться к поверхности. Тем не менее, при импульсной Nd:YAG-сварке есть возможность адаптировать форму импульса таким образом, чтобы дать порам достаточно времени подняться вверх к поверхности. Форма импульса с длительным выдерживанием сегмента, как правило, используется для уменьшения пористости [35].

В большинстве случаев при лазерной микросварке используется защитный газ. Функция защитного газа состоит в том, чтобы защитить поверхность сварного шва от окисления и загрязнения атмосферой. Для микросварки предлагается ряд защитных газов (например,  $N_2$ , Ar, He и  $CO_2$  и т.д.), выбор газа зависит от материала свариваемой детали. Наличие защитного газа также может привести к возникновению пористости во время процесса лазерной сварки. Механизм образования этого дефекта связан с захватом газа в ловушку турбулентными потоками сварочной ванны и каналом [36].

#### 4.2. Оценка сварных швов

После того как шов образован, надо его проконтролировать и оценить его качество, и для этого существует ряд различных доступных методов (визуальные, шлифы, механические испытания и утечки), позволяющих определить его внешний вид, пористость, наличие трещин, герметичность и прочности.

Наиболее простым и широко используемым методом является визуальное наблюдение поверхности сварного шва. Этот способ очень полезен для определения, если швы не загрязнены брызгами и поверхностными окислами, а для углубленного анализа (то есть анализа трещин, проникновения пор в сварном шве и т.д.) требуются металлографические методы. Этот метод очень медленный, но он необходим для оценки швов, и его с крайней осторожностью следует применять при изготовлении срезов очень малых компонентов. Металлургическая лаборатория должна быть хорошо оснащена подходящим оборудованием для резки и полировки сверхмелких деталей.

Проверка на утечку – еще один метод проверки, очень распространенный для оценки герметичности швов.

Для прочности на растяжение используются небольшие разрывные машины для оценки силы микрошвов. Во время испытания методом отрыва сварное соединение часто подвергается сложному напряженному состоянию, чаще на растяжение и сдвиг в зоне сварки [37]. Во время лазерной микросварки важно рассматривать влияние процесса сварки на необработанный исходный

материал. Сила перекрытия сварного шва регулируется плотностью мощности и размером пятна лазерного луча.

Механические свойства этих соединений регулируются до некоторой степени путем изменения ширины сварного шва на границе раздела. Ширина сварного шва, равная или больше, чем толщина самого тонкого листа, является подходящим объектом для подобных исследований. В табл. 4 показано влияние диаметра сварной точки и размера ядра сварной точки на величину предела прочности на сдвиг сварных точек. Эти сварные точки были выполнены одномодовым волоконным лазером мощностью 200 Вт в тонких пластинах из нержавеющей стали. При низкой мощности лазера шов имел очень слабую прочность из-за очень малых размеров ядра на границе раздела. По мере увеличения мощности диаметр шва также увеличивается, из-за большего размера ядра получившиеся сварные точки обладали хорошей прочностью.

Таблица 4. Зависимость диаметра сварной точки от размера ядра сварной точки и прочности на сдвиг (точечная сварка внахлест)

Сочетание материалов	Диаметр сварной точки, мкм	Размер ядра сварной точки, мкм	Предел прочности на сдвиг
20 мкм+25 мкм	75	35	0,40
20 мкм+25 мкм	115	65	1,39
20 мкм+25 мкм	170	95	1,52
25 мкм+35 мкм	95	55	0,57
25 мкм+35 мкм	14	80	1,45
25 мкм+35 мкм	195	110	1,60

## 5. Применение лазерной сварки

Лазерная микросварка играет очень важную роль в соединении микроразмерных деталей в медицине, электронике, автомобильной промышленности, производстве товаров народного потребления, некоторых других отраслях.

### 5.1. Примеры использования лазерной микросварки

Литий-ионные батареи для портативных устройств, как, например, мобильные телефоны и ноутбуки, изготавливаются в очень больших объемах, и поэтому в целях снижения стоимости их производства необходимо создать условия очень высокой пропускной способности на производственных линиях. Известно, что при попадании паров воды в литиевые элементы элементы считаются испорченными, поэтому герметичная упаковка корпусов батарей – критически важное условие для долговременного использования устройств. Лазерное сваривание крышки батарей с корпусом – быстрый, надежный, недорогой и легко автоматизируемый процесс. Импульсные YAG-лазеры дают необходимую энергию импульса и пиковую мощность для того, чтобы изготовить герметично запечатанные швы с требуемым проплавлением и обеспечить механическую прочность. С помощью гальванозеркал и преобразующей оптики подбирают скорость сварки ячеек, и если необходимо, то используется сварку-на-лету.



Другое техническое устройство – дисковый накопитель. Консоль привода в дисковом накопителе содержит ферритовый считыватель, который плавает над вращающимся магнитным носителем на жестком диске. Высокие скорости позиционирования и чрезвычайная близость ферритового считывателя означает, что этот узел должен быть точно собран из трех или четырех частей нержавеющей стали с толщиной от 20 мкм до 200 мкм и более. Конструкция должна учитывать резонансы, жесткость и общую точность компонентов в трех плоскостях. Сборка этих консолей должна быть автоматизирована и обеспечивает высокую воспроизводимость производственного процесса.

Удачным решением в технологии соединения этого устройства стали начала 1980-х годов лазеры. Их способность создавать заданные дискретные уровни энергии и формы импульса для каждого локального места сварки и разных толщин означает, что каждый шов будет адаптирован к задачам разработчика, и скорость сварки может достигать более 150 сварных швов в секунду. На сегодняшний день большинство систем используют гальванозеркала, которые направляют лазерный луч через плоскопольную линзу на компонент. Сверхточные механические зажимы, снабженные приборами контроля позиционирования, удерживают свариваемые части вместе при обработке их лазерным лучом, а сопла доставляют инертный газ в зону сварного шва для создания чистых, гладких, безоксидных сварных швов. Любой хрупкий оксид или брызги расплава на поверхности могут отслоиться и попасть на диск, мгновенно превратив его в брак. Поэтому для создания сварных швов используют низкоомощные Nd:YAG-лазеры или низкоомощные волоконные лазеры.

Медицинские приборы – кардиостимуляторы, дефибрилляторы и нейростимуляторы – сварка имплантируемых медицинских устройств, которые содержат электронику и датчики, требует создания системы управления технологическим процессом изготовления и качеством конечного продукта. Эти устройства должны не только безупречно функционировать, они должны иметь эстетичный вид, быть удобными в стерилизации и не раздражать ткани.

Требования, предъявляемые к выполнению сварных швов на этих имплантируемых устройствах, предполагают создание герметичного уплотнения в непосредственной близости от термочувствительных компонентов. А так как значение компонента очень высоко, то завершение процесса сварки также должно быть аккуратным. Кардиостимуляторы и дефибрилляторы представляют собой электронные устройства, которые заключены в титановую ячейку, содержащую ещё и электронную схему, и аккумулятор. Большую часть лазерной сварки используют в этих блоках при наружной сварке. Устройства нейростимуляторов более сложны в изготовлении, поскольку по сути своей это механический насос и система резервуара, скомпонованные вместе с управляющей электроникой и аккумуляторами. Лазерная сварка различных механических подборок и резервуаров означает, что десятки лазерных сварных швов могут быть частью этих систем.

Маломощные импульсные YAG-лазеры (300 Вт) являются лучшим инструментом для создания медицинской сборки и ее герметизации. Высокая пиковая мощность этих лазеров и низкий теплоподвод позволяют обрабатывать различные сплавы и поддерживать устойчивый процесс, обеспечивая при этом глубокое проникновение. Доставка луча по оптическому волокну – наиболее распространённый способ при лазерной сварке этих частей. Из-за высокой повторяемости размера фокусного пятна и плосковершинного распределения энергии в сечении пучка лазерный инструмент позволяет в процессе микросварки создавать угловые и стыковые соединения, заполнить зазоры и получить хороший размер ядра сварной точки, обеспечить максимальную производительность. Доставка луча по волокну используется при сварке некоторых медицинских устройств волоконными лазерами с постоянной мощностью (200 Вт), но для оптимизации параметров лазера необходимо постоянно следить за лазерным инструментом. Дело в том, что работа в непрерывном режиме влияет на некоторые внутренние элементы лазера, чувствительные к повышению температуры. Лазерная сварка производит герметичное уплотнение, так что примеси не могут диффундировать в рабочие

схемы, и сварка также обеспечивает сохранение инертной атмосферы высокого качества в корпусе электронного устройства. Лазерная сварка имеет очень низкий теплоподвод и может использоваться в непосредственной близости от нахождения полимерных уплотнений, соединений металла со стеклом, паяных компонентов и электронных схем.

## 6. Моделирование управления процессом импульсной сварки

### 6.1. Модель многомерного управляемого процесса импульсной лазерной сварки

В теории автоматического управления одним из основных элементов системы автоматического управления является объект управления. Состояние объекта управления характеризуется совокупностью параметров (показателей, координат), которые в виде сигналов поступают на входы объекта управления и изменяют сигналы на его выходе .

Для осуществления управления процессом сварки и построения управляемой системы «источник энергии - сварное соединение» нужно знать физическую структуру источника, возможные режимы его воздействия на материалы, условия теплопроводности свариваемых материалов и способы реализации управления.

Для моделирования управляемого процесса сварки рассмотрим в качестве объекта управления тепловой процесс сварки, который является одним из основных процессов, которые возникают и протекают при формировании сварного шва.

Рассмотрим основные показатели, определяющие тепловой режим процесса импульсной лазерной сварки, режим импульсного воздействия излучения лазера, возмущения внешней среды и внутренние помехи. Тепловой режим сварки определяется температурой, распределенной по всему объему в зоне сварки. Температура в случае объемного теплового процесса является функцией трех координат  $T(x,y,z)$  и тепловой процесс в теории автоматического управления является системой управления с распределенными параметрами [38].

В случае воздействия концентрированного источника энергии на поверхность полубесконечного тела оси  $x, y$  расположим на поверхности тела, а ось  $z$  направим внутрь тела. Обозначим показатели теплового процесса в этой системе координат. Режим импульсной лазерной сварки характеризуется следующими показателями [39,40]:

– энергия в импульсе лазерного излучения -  $E$

- форма и размеры пятна нагрева -  $S(x, y, t)$
- распределение плотности мощности в пятне нагрева и во время импульса (форма импульса) -  $q(x, y, t)$
- длительность импульса излучения -  $t_{\text{и}}$
- частота следования импульсов -  $f_{\text{и}}$
- скорость сварки -  $V_{\text{св}}$
- длина волны лазерного излучения (частота излучения) -  $\lambda$

Показатели теплового процесса как объекта управления разделим на управляемые, управляющие, заданные и возмущающие. Температура процесса сварки  $T(x, y, z)$  является управляемой величиной. Один или несколько показателей режима импульсного воздействия лазерного излучения - управляющее воздействие (управление), остальные показатели режима импульсного воздействия будут задаваться, т.е. будут отнесены к заданным показателям. Возмущающие воздействия будут учтены в краевых условиях сварного соединения и в допущениях на стыковое или нахлесточное соединения. К возмущающим воздействиям можно отнести тепловые потоки  $q$  на границах свариваемых тел, начальную температуру  $\varphi$  свариваемых тел, изменение зазора в стыке  $\Delta$  и другие неконтролируемые показатели.

## 6.2 Анализ процесса сварки как объекта управления.

Рассмотрим возможности управления процессом импульсной лазерной сварки. Определенная величина энергии в импульсе устанавливается на весь процесс сварки либо возможно изменение величины энергии в импульсе в процессе сварки. Уменьшение энергии импульса используется при сварке кольцевых швов для перекрытия начала шва.

Размеры пятна нагрева можно изменять с помощью фокусировки луча лазера относительно поверхности детали. Возможности изменения размеров пятна излучения достаточно велики, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения. Так минимальный диаметр сфокусированного пятна излучения для твердотельного лазера на стекле с неодимом определяется по формуле [41]:

$$d_n = \frac{4 * \lambda * F}{\pi * D},$$

где

$\lambda$ - длина волны лазерного излучения, мкм ;

F - фокусное расстояние фокусирующей линзы, мм ;

D- апертура пучка лазерного излучения на выходе его из резонатора.

На лазерных установках с рабочим элементом из стекла с неодимом, имеющих длину волны лазерного излучения  $\lambda$ -1,06 мкм, возможно получение диаметра пятна излучения  $d_n \sim 0,2$  мм [41].

Необходимо отметить, что возможно получение одного и того же размера пятна излучения при расположении фокуса над поверхностью детали и под ней. При различном расположении фокуса изменяются условия теплообмена с деталью по поверхности пятна излучения.

Форма пятна нагрева и распределение плотности мощности излучения по пятну нагрева зависят от типа лазера и режима генерации, а также от оптической системы лазерной установки. Обычно пятно нагрева имеет круглую форму с распределением плотности мощности близким к Гауссову распределению [39].

Размер сфокусированного пятна нагрева, частота следования импульсов лазерного излучения и скорость сварки совместно определяют коэффициент

перекрытия сварных точек в сварном шве. Коэффициент перекрытия определяется по формуле [42]:

$$k_n = 1 - \frac{V}{d_n * f_u},$$

где  $V$  - скорость сварки, мм/с;

$f_u$  - частота следования импульсов, Гц;

Определенная частота следования импульсов устанавливается перед началом сварки на весь процесс. Скорость сварки зависит от возможностей вспомогательного оборудования, отвечающего за относительное перемещение свариваемых деталей и луча лазера (вращатель, координатный стол). В связи с этим изменение скорости сварки возможно в широких пределах. Также возможно задавать различный характер движения: непрерывное движение, прерывистое движение и движение с частичным возвратом на ранее сваренные участки шва.

При тепловые процессы при импульсной лазерной сварке можно воздействовать изменением длительности импульса лазерного излучения и изменением распределения мощности по времени импульса (форма импульса). Исследования возможностей изменения данных параметров изучены и рассмотрены в работе [43].

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что необходимо управлять процессом импульсной лазерной сварки, изменяя следующие параметры режима: величину энергии в импульсе, частоту следования импульсов, скорость сварки и размеры пятна нагрева.

### 6.3 Последовательность выбора оптимальных режимов ИЛС.

Для того, чтобы определить последовательность выбора оптимальных режимов, необходимо в первую очередь рассмотреть параметры сварного соединения, выполненного ИЛС. При сварке сварной шов формируется последовательным наложением отдельных сварочных точек. Сварной шов имеет следующие параметры:  $b$ - ширина шва,  $h$ -глубина проплавления,  $p$ - шаг следования сварных точек. Сварной шов также может иметь различную форму проплавления в поперечном сечении.

Важным параметром сварного шва, определяющим его герметичность и влияющим на прочность сварного соединения, является коэффициент перекрытия сварного шва. Коэффициент перекрытия зависит от диаметра пятна нагрева, скорости сварки и частоты следования.

При выборе режима сварки необходимо придерживаться следующей последовательности определения параметров режима.

Во первых необходимо определить необходимую ширину шва  $b$ . Ширина шва определяется в зависимости от толщин свариваемых деталей и геометрии места соединения свариваемых кромок деталей. При сварке деталей малых толщин (до 0,5 мм) рекомендуется выбирать ширину шва в пределах 3...6 толщин более тонкой детали [42].

Ширина шва будет определяться таким параметром режима, как диаметр сфокусированного на поверхность детали пятна нагрева. Один и тот же диаметр пятна нагрева можно получить при расположении фокуса луча над поверхностью детали и под ней. При заглублинии фокуса можно получить швы с большим проплавлением. Однако, при таком расположении фокуса, в случае прогиба сварочной ванны, плотность мощности на ее поверхности увеличивается и испарение металла становится более интенсивным, что может привести к возникновению прожогов. При сварке деталей из осботонких материалов, чтобы избежать прожогов, рекомендуется располагать фокус над поверхностью деталей [39]. Длительность импульса характеризует время воздействия излучения на материал и, следовательно, является временем, за



которое происходит нагрев и расплавление металла. Для каждого материала и толщины, которую необходимо проплавить, существует оптимальный диапазон длительностей импульса, в пределах которого возможно получение сварного соединения без чрезмерного выброса материала из зоны нагрева [39]. На практике при использовании импульсной лазерной сварки необходимо выбирать длительности импульсов ближе к верхнему пределу оптимального диапазона, исходя из технических возможностей лазерных установок.

Далее необходимо определить энергию в импульсе излучения, исходя из необходимых размеров проплавления от одиночного импульса лазерного излучения. При сварке внахлест общая глубина проплавления должна складываться из толщины верхней детали  $h_1$  и глубины частичного расплавления нижней детали  $h_2$ . При сварке встык необходимо обеспечить полное проплавление деталей.

При использовании метода конечных разностей для определения оптимальной энергии в импульсе лазерного излучения с заданной формой распределения плотности мощности по пятну нагрева мы имеем возможность определить форму и размеры проплавления в продольном сечении от одиночного импульса лазерного излучения.

Зная форму и размеры проплавления, необходимо определить шаг сварных точек, при которой будет соблюдаться требование герметичности сварного соединения. Для этого необходимо, чтобы выполнялось условие перекрытия сварных точек в продольном сечении стыка деталей .

Затем необходимо выбрать частоту следования импульсов, которая обеспечивала бы более благоприятный термический цикл в точках сварного шва, в зависимости от размеров свариваемых деталей и, соответственно условий отвода тепла из зоны сварки.

При выбранных размерах пятна нагрева, частоте следования импульсов определим скорость сварки, которая обеспечит необходимый шаг сварных точек  $p$  по формуле [42]:

$$V = p * f_u$$

Полученную скорость сварка необходимо обеспечить настройкой скоростью перемещения координатного стола. Скорость сварки будет определять производительность процесса сварки, поэтому по возможности необходимо стремиться к ее увеличению.

#### 6.4 Выбор оптимальной частоты следования импульсов

Оптимальную частоту следования импульсов лазерного излучения необходимо выбирать, исходя из следующих соображений:

- 1) частота следования импульсов должна быть такой, чтобы обеспечивать более «мягкий» термический цикл в точках сварного шва
- 2) частота следования импульсов не должна превышать значения, при котором тепловложение в свариваемые детали будет являться избыточным
- 3) необходимо стремиться к увеличению частоты следования импульсов при выполнении условий 1, 2 с целью повышения скорости сварки, и, соответственно, производительности процесса сварки

Как было показано в главе 2 импульсная лазерная сварка характеризуется жестким термомодеформационным циклом. На характер термического цикла при сварке импульсным источником энергии впервую очередь влияет такой параметр режима, как жесткость режима импульсной сварки. Жесткость режима определяется по формуле [43]:

$$G = \frac{t_n}{t_u},$$

где

$t_n$  - длительность паузы;

$t_u$  - длительность импульса.

Для импульсной лазерной сварки с пределами изменения длительности импульса от 2 до 8 миллисекунд и изменением частоты следования импульсов от 1 до 10 Гц жесткость режима сварки принимает значения 12...500. Кроме того,

на термический цикл будет оказывать существенное влияние условия теплоотвода из зоны сварки, которые определяются теплофизическими характеристиками материала и толщиной деталей.

За время  $t_u$  действия импульса источника мощностью  $q_u$  в изделие вводится количество энергии [43]:

$$E_u = t_u * q_u$$

Погонная энергия по длине сварного шва, полученного наложением сварных точек с шагом  $p$  определяется выражением:

$$Q_n = \frac{E_u}{p}$$

Этот показатель используется для определения энергетической характеристики импульсного источника [43].

## 7. Выводы

Лазерная микросварка – хорошо отработанная технология. В настоящее время создан ряд промышленных лазеров, обеспечивающих пучок высокого качества, способных сформировать на поверхности обрабатываемой детали пятно с размером, ограниченным только дифракционным пределом (такие лазеры стали коммерчески доступны для пользователей).

Появляется все больше и больше технических устройств, для создания которых требуется соединять разнородные металлы с различными механическими и физическими свойствами, что создает большие проблемы при их сварке. Дело в том, что большинство лазерных сварных швов малых масштабов очень быстро охлаждается, а это ведет к образованию многих дефектов сварки, способных привести к разрушению соединения, хотя в справочниках это сочетание материалов указывается как свариваемое.

Ключевой тенденцией в развитии микросварки является стремление к созданию более цельной системы микросварки. Это подразумевает разработку и проектирование особых оправок для обрабатываемых материалов с хорошим креплением и одновременно с хорошей системой улавливания выделяющихся газов, хорошей системы видеонаблюдения процесса. Легко создавать крепкие

сварные швы в лабораторных условиях, оптимизируя параметры и лазера, и процесса обработки. В производстве, однако, поддерживать оптимальные выходные параметры и моду лазерного луча нелегко, так как характеристики фокусирующей оптики могут ухудшиться со временем, а покровные стекла – деградировать. На качество сварного шва также могут влиять не только параметры лазерного инструмента, но и условия процесса – зазор между соединяемыми частями, изменения в исходных материалах, загрязнения (масло или пыль), положение фокуса и окисление обрабатываемой поверхности. Таким образом, будет полезно и экономически выгодно оценивать качество сварного шва при мониторинге процесса сварки. Использование полной системы микросварки обладает потенциалом для улучшения общего качества сварки, снижения затрат и повышения эффективности при уменьшении человеческого фактора и естественной изменчивости ручного процесса.

#### Моделирование лазерных процессов

Для сокращения временных и денежных затрат на разработки существует необходимость виртуальных средств валидации, или виртуальных эталонных средств, которые позволят детально варьировать технические параметры, чтобы найти стабильное технологическое окно процесса соединения. Для лазерных технологий методы моделирования пока не доступны из-за сложности процесса лазерной сварки. По этой причине дальнейшее развитие моделирования лазерных процессов для полного понимания деталей процесса лазерной сварки по-прежнему остается актуальным. Более глубокое понимание процесса обеспечит улучшение качества применения лазеров, если можно будет выявить причины таких недостатков шва, как поры, трещины и брызги, и избежать их возникновения с помощью оптимизации определенного процесса.

Даже для такой достаточно простой модели лазерного шва, как нахлесточное соединение двух ровных металлических листов, процесс моделирования должен учитывать много физических факторов и динамических эффектов: зависимость поглощения лазерного излучения от длины волны, зависимость поляризации от различных углов падения, зависимость от

температуры свойств материала в различных фазах( твердой, жидкой и газовой фазе /плазме) и при разных давлениях, которые определяют динамику в расплаве и в системе парогазовый канал-облако пара, чтобы принимать в расчет только некоторые из них. Многие из этих физических свойств доступны только для конкретных температур в идеальных лабораторных условиях, но для диапазона температур реального процесса лазерной сварки они заведомо не известны. Неизвестные значения можно лишь оценить или вычислить, если существуют подходящие физические модели. Тем не менее есть модели, имитирующие процессы (Otto and Schmidt, 2010), численные расчеты по которым обнаруживают поразительное совпадение с результатами реальных процессов лазерной, но усилия, затраченные при этом на вычисления, огромны.

На следующем этапе должны быть разработаны модели лазерного процесса, более прогнозирующие течение реальных процессов лазерной сварки. Когда моделирование процесса лазерной сварки сможет давать надежные прогнозы для применения лазеров, тогда перед изготовлением прототипа можно будет ответить на вопрос, могут ли новые конструкции кузова из композитных материалов быть выполнены с помощью технологии лазерной сварки Это позволит сократить период разработки, повысит качество лазерной сварки и массово сократит расходы на дорогостоящие эксперименты по безопасности.

С этого момента виртуальные технологии, такие как моделирование лазерного процесса, станут важным инструментом лазерных технологий в кузовном цехе и за его пределами.

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1В41	Карпову Александру Сергеевичу

<b>Школа</b>	<b>ИШНКБ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>Электронной инженерии</b>
<b>Уровень образования</b>	<b>Бакалавр</b>	<b>Направление/специальность</b>	<b>Машиностроение</b>

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Анализ информации предоставленной в российских и зарубежных источниках и публикациях, нормативно-правовых документах.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

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

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Анализ конкурентных технических решений, SWOT анализ</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Расчет бюджета научно-технического исследования: материальных затрат НИИ; основной и дополнительной заработной платы исполнителей темы; отчисления во внебюджетные фонды; накладные расходы.</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	

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

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. Бюджет НИ

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ст.преп.	Николаенко В.С.			

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1В41	Карпов Александр Сергеевич		

## 8. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

### Введение

Объектом исследования в работе является «Разработка процесса импульсной лазерной сварки высокопрочных легированных сталей», выполняемая в рамках научно-исследовательской работы. Основная задача состоит в том, чтобы разработать технологию импульсной лазерной сварки, которая будет использоваться для получения стыкового соединения пластин.

Целью данного раздела является сравнение предлагаемой технологии с технологиями, которые уже существуют и являются основными в этой сфере.

В данном разделе мы разобрали такие вопросы как:

- конкурентоспособность
- SWOT-анализ
- заработная плата
- баланс рабочего времени
- отчисления и расходы

### 8.1 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим конкурентам. В настоящий момент единственным конкурентом разрабатываемой в данной работе технологии является контактная точечная сварка. В таблице 5 приведена оценочная карта, включающая конкурентные технические разработки в области производства катализаторов ФТ.

Таблица 5 – Оценочная карта

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>
1	2	Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>
Технические критерии катализатора					
1.Повышение производительности	0,3	5	4	1,5	1,2
2.Удобство в эксплуатации	0,1	4	4	0,4	0,4
3.Безопасность	0,1	4	3	0,4	0,3
4.Простота эксплуатации	0,1	4	3	0,4	0,3
Экономические критерии оценки эффективности					
5.Цена	0,2	4	4	0,8	0,8
6.Срок выхода на рынок	0,1	3	5	0,3	0,5
Итоги:	0,9			3,8	3,5

Б<sub>ф</sub>-технология, разрабатываемая в ходе исследовательской работы;

Б<sub>к1</sub>-технология контактной точечной сварки.

Таким образом, на основании таблицы 5 можно сделать вывод, что технология лазерной сварки, разработанная в ходе исследовательской работы, может составить серьезную конкуренцию распространенной в настоящее время контактной стыковой сварке циркониевых сплавов. Главными преимуществами данной технологии является повышение производительности, безопасность и простота эксплуатации.

## 8.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

На основе работы, проведенной в предыдущих разделах бакалаврской работы, был составлен SWOT-анализ научно-исследовательского проекта. Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены в таблице 6.



Таблица 6 – Матрица первого этапа SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Более высокая производительность, по сравнению с другими технологиями</p> <p>С2. Квалифицированный персонал</p> <p>С3. Актуальность проекта</p> <p>С4. Экологичность и безопасность технологии</p>	<p>Слабые стороны научноисследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Окончательный вариант технологии, который можно будет ввести в производство, далек от завершения</p> <p>Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2. Получение качественных сварных соединений</p> <p>В3. Повышение стоимости конкурентных разработок</p>	<p>Высокая производительность технологии, а также ее экологичность и безопасность увеличивает стоимость конкурентных разработок.</p> <p>Актуальность работы позволит привлечь инновационную инфраструктуру ТПУ в дальнейших исследованиях</p>	<p>Отсутствие квалифицированного персонала ведет к снижению качества сварных соединений</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Появление новых технологий</p> <p>У2. Отсутствие спроса на новые технологии производства</p>	<p>Появление новых технологий может привести к утрате актуальности исследования и снижению</p>	<p>Отсутствие квалификации у специалистов может повлиять на спрос потенциальных потребителей.</p> <p>Несвоевременное финансовое обеспечение</p>

УЗ. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства	сравнительной производительности	исследования увеличивает срок разработки окончательного варианта технологии.
---	----------------------------------	--

### 8.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с выполнением.

#### 8.3.1 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + K_T) * \sum_{i=1}^m C_i * N_{расxi}$$

где:  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

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

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

$K_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов.

Таблица 7 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед, руб.	Затраты на материалы,
Сталь	кг	1	7400	8000
Бумага	Лист	100	2	230
Картридж для принтера	Шт.	1	1000	1150
Интернет	М/бит (пакет)	1	350	350
Итого				9730

8.3.2 Основная и дополнительная заработная плата исполнителей  
 Месячный должностной оклад работника сведем в таблицу 8:

Таблица 8 – Оклад работника

Исполнители по категориям	Оклад, руб.	Районный коэффициент (для Томска)	Месячная зарплата, руб./мес
Руководитель	20800	1,3	27040
Инженер	700	1,3	9100

Таблица 9 – Баланс рабочего времени

Показатель рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
-выходные	104	104
-праздничные	14	14
Потери рабочего времени		
-отпуск	28	28
-невыходы по болезни	-	-
Действительный годовой фонд раб.времени	219	219

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = K_{\text{доп}} * Z_{\text{осн}},$$

где:  $K_{\text{доп}}$  - коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

$$Z_{\text{доп}} = 0,13 * 27040 = 3515,2$$

$$Z_{\text{доп}} = 0,13 * 9100 = 1183$$

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = K_{внеб} * (З_{осн} + З_{доп}),$$

где:  $K_{внеб}$  -коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2018 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2018 году водится пониженная ставка – 30,2%.

$$З_{внеб} = 0,302 * (27040 + 3515,2) = 9227,65$$

$$З_{внеб} = 0,302 * (9100 + 1183) = 3105,45$$

Таблица 10 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб	Дополнительная заработная плата, руб
Руководитель проекта	27040	3515,2
Студент	9100	1183
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,302	
Итого	12333,10	

Суммарное отчисление во внебюджетные фонды составило 12333,10 руб.

### 8.3.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{накл} = K_{нр} * (\text{сумма статей } 1 \div 5),$$

где:  $K_{нр}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%

$$Z_{\text{накл}} = 0,16 * 85194,3 = 13631,1$$

8.3.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта  
 Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечания
1. Материальные затраты НТИ	9730	
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	36140	
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	4598,2	
4. Отчисления во внебюджетные фонды	12333,1	
5. Накладные расходы	13631,1	
7. Бюджет затрат НТИ	76432,4	

При планировании бюджета было обеспечено полное отражение всех видов возможных расходов, необходимых для его выполнения.

#### 8.4 Вывод

Для достижения главной цели раздела решались такие важные задачи, как:

1) На основе SWOT-анализа провели выявление сильных сторон и возможностей проект, а также слабых сторон и угроз. Для извлечения дополнительных преимуществ необходимо дальнейшее развитие технологии; 2) при планировании бюджета было обеспечено полное отражение всех видов возможных расходов, необходимых для его выполнения, сумма бюджета составляет 76432,4 рублей.

При итоговом анализе раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», можно сделать вывод, что технология лазерной сварки высокопрочных легированных сталей достаточно конкурентоспособна и эффективна. Она обеспечивает высокую производительность, безопасность и экологичность, по сравнению с контактной точечной сваркой, которая сейчас наиболее распространена для соединения сталей, а также высокое качество сварных швов. Исследования являются актуальными и, при наличии квалифицированных специалистов у потенциальных потребителей, технология может внедриться в любое производство. Однако, при несвоевременном финансовом обеспечении научного исследования со стороны государства, возможно затруднение дальнейших работ, что может привести к задержке выхода в производство.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1В41	Карпову Александру Сергеевичу

<b>Школа</b>	<b>ИШНКБ</b>	<b>Отделение</b>	<b>Электронной инженерии</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	Машиностроение

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

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Импульсная лазерная сварка. Применяется в промышленности: <ul style="list-style-type: none"> <li>• машиностроение и авиастроение</li> <li>• медицина</li> <li>• электроника</li> </ul>
--	---

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

<b>1. Производственная безопасность</b> 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:	Анализ выявленных вредных факторов: <ul style="list-style-type: none"> <li>• отклонение параметров микроклимата в помещении;</li> <li>• лазерное излучение.</li> </ul> Анализ выявленных опасных факторов: <ul style="list-style-type: none"> <li>• электробезопасность.</li> </ul>
<b>2. Экологическая безопасность:</b>	Воздействие на окружающую среду сводится к минимуму.
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможными чрезвычайными ситуациями являются пожары и ситуации природного характера.
<b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>	Соблюдение законов (налоговое законодательство, трудовой и гражданский кодексы).

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И.Л.	—		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1В41	Карпов Александр Сергеевич		

## 9. Социальная ответственность

### Введение

В работе разработана технология импульсной лазерной сварки высокопрочных легированных сталей. Данная технология предусматривает, что работы будут проводиться на заводах и промышленных помещениях. Разработанное решение может применяться в машиностроительной и медицинской промышленности.

### 9.1 Производственная безопасность.

#### Анализ вредных и опасных факторов

Производственная безопасность представляет собой систему организационных мероприятий и технических средств, уменьшающих вероятность воздействия на персонал опасных производственных факторов, вредных воздействий технологических процессов, энергии, средств, предметов, условий и режимов труда до приемлемого уровня. Необходимо выявить вредные и опасные производственные факторы, которые могут возникать при работе на установке ALFA-100. По степени опасности лазерного излучения установка относится к 4 классу [44, 45]. Результаты проведения анализа представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Опасные и вредные факторы при разработке технологии сварки элементов ТВС

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы		Нормативные документы	
	Вредные	Опасные	Вредные факторы	Опасные факторы
Процесс микросварки	Лазерное излучение (прямое, зеркально отраженное)	Повышенное значение напряжения в электрической цепи	ГОСТ 12.1.040-83 [57]	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ [59]
	Отклонение параметров микроклимата в помещении		СанПиН 2.2.4.548-96 [58]	



### 9.1.1 Лазерное излучение

Это излучение формируется в оптических квантовых генераторах (лазерах) и представляет собой оптическое когерентное излучение, характеризующееся высокой направленностью и большой плотностью энергии. Главный элемент лазера, где формируется излучение, - активная среда, для образования которой используют: воздействие света не лазерных источников, электрический разряд в газах, химические реакции, бомбардировку электрическим пучком и другие методы.

Области применения лазера определяются энергией используемого лазерного излучения. Под воздействием лазерного излучения нарушается жизнедеятельность как отдельных органов, так и организма в целом. В настоящее время установлено специфическое действие лазерных излучений на биологические объекты, отличающееся от действия других опасных производственных физических и химических факторов. При воздействии лазерного излучения на сплошную биологическую структуру (например, на организм человека) различают три стадии: физическую, физико-химическую и химическую. На первой стадии (физической) происходят элементарные взаимодействия излучения с веществом, характер которых зависит от анатомических, оптико-физических и функциональных особенностей ткани, а также от энергетических и пространственных характеристик излучения и, прежде всего, от длины волны и интенсивности излучения. На этой стадии происходит нагревание вещества, преобразование энергии электромагнитного излучения в механические колебания, ионизация атомов и молекул, возбуждение и переход электронов с валентных уровней в зону проводимости, рекомбинация возбужденных атомов и др. При воздействии непрерывного лазерного излучения преобладает в основном тепловой механизм действия, в результате которого происходит свертывание белка, а при больших мощностях – испарение биоткани. При импульсном режиме (с длительностью импульсов меньше  $10^{-2}$  с) механизм взаимодействия становится более сплошным и приводит к преобразованию излучения в энергию механических колебаний среды, в

частности ударной волны. При мощности излучения свыше 107 Вт и высокой степени фокусировки лазерного луча возможно возникновение ионизирующих излучений.

На второй стадии (физико-химической) из ионов и возбужденных молекул образуются свободные радикалы, обладающие высокой способностью к химическим реакциям. На третьей стадии (химической) свободные радикалы реагируют с молекулами веществ, входящих в состав живой ткани, и при этом возникают те молекулярные повреждения, которые в дальнейшем определяют общую картину воздействия лазерного излучения на облучаемую ткань и организм в целом.

По степени опасности лазерного излучения лазеры подразделяются на следующие классы [45]: I - малоопасные (воздействия прямого и зеркально отраженного излучения только на глаза); II - средней опасности (воздействия на глаза прямого, зеркально и диффузно отраженного излучения, а также прямого и зеркально отраженного излучения на кожу); III - опасные (воздействия на глаза, кожу прямого, зеркально и диффузно отраженного излучения; работа лазеров сопровождается возникновением других опасностей и вредных производственных факторов); IV - высокой опасности (опасности, характерные для лазеров I-III классов, а также ионизирующее излучение с уровнем, превышающим установленные допустимые пределы). Работы с лазерами следует проводить в отдельных, специально выделенных помещениях или отгороженных частях помещений. Само помещение изнутри, оборудование и предметы, находящиеся в нем, не должны иметь зеркально отражающих поверхностей, если на них может падать прямой или отраженный луч лазера. В помещение или в зону помещения с действующими лазерными установками должен быть ограничен доступ лиц, не имеющих отношения к работе установок. В качестве индивидуальных средств защиты рекомендуются защитные очки из специального стекла.

Очки целесообразно монтировать в маску или полумаску, защищающую лицо. Руки защищаются хлопчатобумажными перчатками. Для защиты остальных частей тела достаточна обычная одежда[44].

#### 9.1.2 Отклонение параметров микроклимата в помещении

Микроклимат производственных помещений - это климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха[46]. Согласно [47] показателями, характеризующими микроклимат, являются: температура воздуха, относительная влажность воздуха, скорость движения воздуха, интенсивность теплового излучения.

Указанные параметры – каждый в отдельности и в совокупности – оказывают значительное влияние на работоспособность человека, его самочувствие и здоровье. При определенных их значениях человек испытывает состояние теплового комфорта, что способствует повышению производительности труда, предупреждению простудных заболеваний. И, наоборот, неблагоприятные значения микроклиматических показателей могут стать причиной снижения производственных показателей в работе, привести к таким заболеваниям работающих как различные формы простуды, радикулит, хронический бронхит, тонзиллит и др.

Для создания благоприятных условий работы, соответствующих физиологическим потребностям человеческого организма, санитарные нормы устанавливают оптимальные и допустимые метеорологические условия в рабочей зоне помещения.

Рабочая зона ограничивается высотой 2,2 м над уровнем пола, где находится рабочее место. При этом нормируются: температура, относительная влажность и скорость движения воздуха СанПиН 2.2.4.548-96. Все категории работ разграничиваются на основе интенсивности энергозатрат организма в Вт.

Таблица 13 – Оптимальные показатели микроклимата

Период года	Температура, град. С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	21-23	40-60	0,1
Теплый	22-24	40-60	0,1

Таблица 14 – Допустимые показатели микроклимата

Период года	Температура, град. С		Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с	
	Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин		Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин
Холодный	19 – 20,9	23,1 – 24	15 – 75	0,1	0,2
Теплый	20 – 21,9	24,1 – 28	15 – 75	0,1	0,3

Отопление лаборатории и корпуса в целом водяное с применением радиаторов, что обеспечивает постоянное и равномерное нагревание воздуха в холодное время года. В рабочем помещении имеется как естественная вентиляция, так и принудительная. Для обеспечения оптимальных и допустимых показателей микроклимата в холодный период года следует применять средства защиты рабочих мест от остекленных поверхностей оконных проемов, чтобы не было охлаждения. В теплый период года необходимо предусмотреть защиту от попадания прямых солнечных лучей.

### 9.1.3 Электробезопасность

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока [48].

В зависимости от индивидуальных показателей человека (масса, рост, строение тела, пол, род занятий), его физического состояния (болезнь, наличие состояния алкогольного опьянения), параметров протекающего тока (сила тока и его частота), состояния окружающей среды зависит поражающее воздействие на организм.

Одним из наиболее опасных параметров являются переменный ток с частотой от 10 до 120 Гц. Наиболее безопасным напряжением для человека является до 12 В, условно безопасным до 36 В. Опасной величиной считается ток, более 1мА, а смертельным более 100мА. Опасность поражения человека электрическим током существует во всех случаях, когда используются электрические установки и оборудование. Для предотвращения электрического поражения необходимо по возможности исключить причины поражения, к которым относятся:

- случайные прикосновения к токоведущим частям, находящимся под напряжением;
- появление напряжения на механических частях электрооборудования (корпусах, кожухах и т.д.) в результате повреждения изоляции или других причин;
- появление напряжения на отключённых токоведущих частях, на которых работают люди в результате ошибочного включения;
- возникновения напряжения на поверхности земли или на опорной поверхности.

Основными техническими средствами защиты человека от поражения электрическим током, используемыми отдельно или в сочетании друг с другом, являются (ПУЭ): защитное заземление, защитное зануление, защитное отключение, электрическое разделение сети, малое напряжение,

электрозащитные средства, уравнивание потенциалов, двойная изоляция, предупредительная сигнализация, блокировка, знаки безопасности.

Установка ALFA-100 снабжена контуром заземления (PE), включающего в себя защитный проводник (заземляющий проводник, нулевой защитный проводник, защитный проводник системы уравнивания потенциалов).

## 9.2. Экологическая безопасность

Экологическая безопасность – это допустимый уровень негативного воздействия со стороны природных и антропогенных факторов экологической опасности на окружающую среду и человека.

Согласно [49] при работе установки лазерной сварки ALFA-100 не выделяется и не выбрасывается в воду, атмосферу, вентиляцию или в рабочую зону каких-либо вредных веществ, газов, аэрозолей, дымов и т.д., превышающих допустимые уровни ПДК.

Соответственно, негативное влияние на атмосферу будет заключаться только в скоплении пыли на рабочем месте, а воздействие на литосферу будет характеризоваться утилизацией твердых бытовых отходов (бумага, бракованные образцы ит.п.).

Решения по обеспечению экологической безопасности:

для литосферы – вывоз твердых бытовых отходов, с последующей переработкой, ГОСТ 17.4.3.04-85 [50].

для атмосферы – проведение ежедневной влажной уборки на рабочем месте и проветривание помещения.

### 9.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.

Согласно ГОСТ Р 22.0.07-95, чрезвычайная ситуация – обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, стихийного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде.

#### 9.3.1 Пожарная безопасность

Пожаром называется неконтролируемое горение вне специального очага, наносящего материальный ущерб. Согласно ГОСТ12.1.033–81 понятие пожарная безопасность означает состояние объекта, при котором с установленной вероятностью исключается возможность возникновения и развития пожара и воздействия на людей опасных факторов пожара, а также обеспечивается защита материальных ценностей.

Пожарная безопасность предусматривает обеспечение безопасности людей и сохранения материальных ценностей предприятия на всех стадиях его жизненного цикла. Основными системами пожарной безопасности являются системы предотвращения пожара и противопожарной защиты, включая организационно-технические мероприятия.

Возникновение пожара при работе на аппарате для лазерной сварки ALFA-100 может быть по причинам как электрического, так и не электрического характера. Причины возникновения пожара неэлектрического характера: халатное неосторожное обращение с огнем (курение, оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня). Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п.

Для устранения причин возникновения пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

- использование только исправного оборудования;
- проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- назначение ответственного за пожарную безопасность помещений;
- издание приказов по вопросам усиления пожарной безопасности
- отключение электрооборудования, освещения и электропитания по окончании работ;
- курение в строго отведенном месте;
- содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В. Кроме того, порошковые применяют для тушения документов. Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например, ОП-5.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м.

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к эвакуационному выходу.



9.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности  
Большое значение в работе имеет организация рабочих мест сотрудников и создание благоприятных условий труда.

Работа в лаборатории обычно отличается малой двигательной активностью, монотонностью, длительным нахождением в закрытом помещении. Всё это вызывает быструю утомляемость и естественно отражается на результатах труда.

Режим труда и отдыха предусматривает соблюдение определенной длительности непрерывной работы на твердомере, ПК и перерывов, регламентированных с учетом продолжительности рабочей смены, видов и категории трудовой деятельности.

Расстояние между лазерными установками должны обеспечивать безопасные условия труда и удобства при эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте, при этом рекомендуется: при однорядном расположении – не менее 1,5 м; при двухрядном – не менее 1,0 м. Рабочее место должно быть организовано таким образом, чтобы исключить воздействие лазерного излучения. Высота траектории прохождения лазерного пучка должна превышать 2,2 м.

Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.

Предполагается, что человек будет работать оператором, поэтому он практически не будет подвержен опасным факторам. Но в крайнем случае возможно отравление аргоном, поэтому при повреждении здоровья или в случае смерти работника вследствие несчастного случая на производстве либо профессионального заболевания работнику (его семье) возмещаются его утраченный заработок (доход), а также связанные с повреждением здоровья дополнительные расходы на медицинскую, социальную и профессиональную реабилитацию либо соответствующие расходы в связи со смертью работника. Виды, объемы и условия предоставления работникам гарантий и компенсаций в указанных случаях определяются федеральными законами .

### Заключение

В ходе выполнения ВКР был проведен анализ особенностей применения лазерной сварки тонкостенных деталей из нержавеющей стали. Приведены конструктивные особенности лазерных установок: CO<sub>2</sub>-лазер, волоконный, Nd:YAG-лазер. Исходя из особенностей их функционирования рекомендовано использование для решения поставленных задач импульсный Nd:YAG-лазер, разработана технология получения стыкового соединения листов из стали 12X18H10T.

## Литература

1. Olowinsky A. M., Kramer, T. and Durand, F., Laser beam micro welding in watch industry, *Proc. SPIE — The International Society for Optical Engineering*, Vol. 4637, 2002. Photon Processing in Microelectronics and Photonics, San Jose, CA, pp. 571—580.
2. Witte, R., Herfurth, H.J. and Bauer, I., Microjoining of dissimilar materials for optoelectronic and biomedical applications, *Proc. SPIE — The International Society for Optical Engineering*, Vol. 4979, 2003, Micromachining and Microfabrication Process Technology VIII, San Jose, CA, pp. 226—233.
3. Ready, J. and Farson, D. (eds), *Handbook of Laser Materials Processing*, Laser Institute of America, Orlando, FL, 2003.
4. Hugel, H., New solid-state lasers and their application potential, *Optics and Lasers in Engineering*, 34, 2000, 213—229.
5. Koechner, W., *Solid-state Laser Engineering*, 2nd edn, Springer-Verlag, Berlin, 1988.
6. Dawes, D.G., Growing crystals for solid state lasers, *Lasers and Optronics*, December 1987.
7. Naeem, M., Material processing with super-modulation, Proc. ICALEO 2002, Laser Institute of America, Scottsdale, AZ, 2002
8. Naeem, M., Welding performance of a 2kW continuous wave supermodulated Nd:YAG laser - increased weld speed, weld penetration and reduced porosity with supermodulated power, Proc. PICALO 2008, Laser Institute of America, Beijing, China, 2008.
9. Graham, H., Throwing light on materials processing – an addition to laser family, TWI Bulletin, May-June 2006.

10. Naeem, M., The influence of pulse shaping on laser material processing, Proc. 9th NOLAMP Conference, *Nordic Conference on Laser Material Processing*, Trondheim, Norway, 2003, pp. 239-249.
11. Norman, S., Zervas, M.N., Appleyard, A., Durkin, M.K., Horley, R., Varnham, M.P., Nilsson, J. and Jeong, Y., Latest development of high-power fibre lasers, Proc. SPIE, Vol. 5335, 2004, *Fibre Lasers: Technology, Systems, and Applications*, San Jose, CA, p. 229.
12. Dominic, V., MacCormack, S., Waarts, R., Sanders, S., Bicknese, S., Dohle, R., Wolak, E., Yeh, P. S. and Zucker, E., 110 W fibre laser, *Electronics Letters*, **35**, 1999, 1158.
13. Naeem, M., Micromachining with a single mode 100W fibre laser, *Proc. LAMP*, Kyoto Research Park, Kyoto, Japan, 2006.
14. Naeem, M. and Lewis, S., Pulsed Nd:YAG laser or continuous wave fibre laser for micromachining, *Proc. WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*, Munich, 2007.
15. Reichel, V., Unger, S., Hagemann, H. and Auerbach, M., 8W highly efficient Ybdoped fibre laser, 2000, *Proc. SPIE*, 3889.
16. Nilsson, J., Grudinin, A. B. and Turner, P.W., Advanced pulsed and CW high-power fibre laser, *Proc. CLEO*, 2000.
17. Schoenfelder, A., Fibre lasers address micromachining methods, *Laser Focus World*, June 1999.
18. Hunter, B. V., Leong, K.H., Miller, C.B., Golden, J. F., Glesias, R. D. and Lavery, P.J., Selecting a high-power fibre-optic laser beam delivery system, *Proc. ICALEO'96*, Laser Institute of America, Orlando, FL, 1996, Section E, pp. 173–182.
19. JK Lasers, GSI Company Group, Product Datasheets & Brochures, 2010, <http://www.jklasers.com/downloads>.

20. Naeem, M. and Collins, P., Micro-joining with pulsed Nd:YAG laser, *Proc. WLTC Conference on Lasers in Manufacturing*, Munich, 2005, pp. 643–649.
21. Zacharia, T., David, S. A., Vitek, J. M. and DebRoy, T., Weld pool development during GTA and laser beam welding of type 304 stainless steel, Part I – Theoretical analysis, *Welding Journal*, **68**, 1989, 499s-509s.
22. Zacharia, T., David, S.A., Vitek, J. M., and DebRoy, T., Heat transfer during Nd:YAG pulsed laser welding and its effect on solidification structure of austenitic stainless steels, *Metallurgical Transactions A*, **20A**, 1989, pp. 957—967.
23. Tomie, M., Abe, N., Yao, X. and Arata, Y., 1988, Tandem electron beam welding (Report - VIII), *Transactions of JWRI*, **17** (1), 1988, 299–303.
24. Arata, Y. and Miyamoto, I., Laser welding, *Technostat*, **11** (5), 1978, 33–42.
25. Miyamoto, I., Maruo, H. and Arata, Y., Mechanism of bead-transition in laser welding, *Int. Conference Welding Research in the 1980s*, Osaka, The High Temperature Society, 1980, pp. 103-108.
26. Miyamoto, I. and Knorovsky, G.A., Laser microwelding, *Microjoining and Nanojoining* (Ed. Zhou, Y.), Woodhead Publishing, Cambridge, 2008, pp. 345–417.
27. Pittaway, L.G.. The temperature distributions in thin foil and semi-infinite targets bombarded by an electron beam, *Brit. J. Appl. Phys.*, **15**, 1964, 967–982.
28. Ready, J. F. *Industrial Applications of Lasers*, New York, Academic Press, 1978.
29. Deininger, C., Mueller-Borhanian, J., Dausinger, F. and Huegel, H., Development of multi-detector systems for processing monitoring of laser beam welding capable for industrial use, *Proc. Lane 2004*, Erlangen, CIRP, 2004, pp. 107–117.

30. Seibold, G., Dausinger, F. and Huegel, H., Absorptivity of Nd:YAG laser on iron and steel depending on temperature and surface condition, *Proc. ICALEO 2000*, Laser Institute of America, Dearborn, MI, 2000, pp. E125-E132.
31. Naeem, M., Modulation techniques for enhanced material processing using single mode fibre laser, *Proc. ICALEO 2008*, Laser Institute of America, Temecula, CA, 2008.
32. Naeem, M., JK Lasers, GSI Group, internal report, 2007.
33. Boisselier, D., Comparison des performances laser YAG à fibre optique et CO<sub>2</sub>, iSlab pour le soudage des alliages d'aluminium, *Proc. CISFFEL 6*, Toulon, France, 1998.
34. Venkat, S., CO<sub>2</sub> laser beam welding of aluminium alloys, *Welding Journal*, 76, 1976, 275s–282s.
35. Katayama, S., Kohsaka, S., Mizutani, M., Nishizawa, K. and Matsunawa, A., Pulse shape optimisation for defect prevention in pulsed laser welding of stainless steels, *12th International Conference Applications of Laser and Electro-optics (ICALEO'93)*, Jacksonville, Laser Institute of America, 2001, pp. 487–497.
36. Katayama, S. and Matsunawa, A., Formation mechanism and prevention of defects in laser welding of aluminium alloys, *Proc. CISFFEL 6*, Toulon, France, 1998.
37. Dieter, G.E., *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, New York, 1986.
38. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. -М: Наука, 1975, - 568с.
39. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 5. Лазерная сварка металлов: Учеб. пособие / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов; Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Высш. шк., 1988. - 207с.
40. Мостяев В.А., Углов А.А. Оценка тепловых процессов при импульсной лазерной сварке // Сварочное производство. 1977. №10. С. 1-2.

41. Чирков А.М. Высокоэффективный процесс сварки кольцевых соединений малого диаметра из высокоуглеродистых хромистых сталей: Дис. кандидата техн. наук: 05.03.06.-КироБ, 2001.-88 с.
42. Лазерная импульсная точечная и шовная сварка конструкционных, нержавеющей, жаропрочных сталей и цветных сплавов в среде инертного газа: ТР 1.4.1931 -89. - Введ. 01.07.90. - М: НИАТ, 1990. -16с.
43. Худышев А.Ф., Славин Г.А. Исследование технологических возможностей импульсной электронно-лучевой сварки тонкостенных материалов// ФиХОМ. 1971. №3.0.14-19.
44. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств. Охрана труда : учебное пособие для вузов / П. П. Кукин [и др.]. — 5-е изд., стер. — Москва: Высшая школа, 2009. — 335 с.
45. ГОСТ 12.1.040-83.ССБТ. Лазерная безопасность. Общие положения.
46. ГОСТ 12.0.003–74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
47. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий. — М.: Госкомсанэпиднадзор, 2003.
48. Р 2.2.2006-05. Руководство гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда.
49. Лазерный аппарат для сварки ЛТА 4-2. Техническое описание и условия эксплуатации – М: Лазеры и аппаратура, 2007. – 27 с.
50. ГОСТ 12.1.009-76 межгосударственный стандарт система стандартов безопасности труда.

Приложение А  
Технологический процесс сборки и сварки стыкового соединения пластин