

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

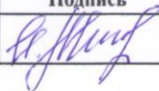
Институт физики высоких технологий  
Направление подготовки 12.04.02 «Оптотехника»  
Кафедра лазерной и световой техники

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

| Тема работы                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| «Исследование очагов воздействия лазерного излучения на поверхности углеродистой стали» |

УДК 536.442.1: 62.408

Студент

| Группа | ФИО                    | Подпись                                                                             | Дата     |
|--------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 4ВМ4Б  | Макогон Иван Сергеевич |  | 28.05.16 |

Руководитель

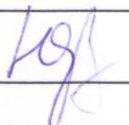
| Должность | ФИО                | Ученая степень, звание | Подпись                                                                              | Дата    |
|-----------|--------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Доцент    | Зыков Илья Юрьевич | К. ф.-м. н.,<br>доцент |  | 1.06.16 |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

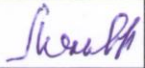
По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность             | ФИО                             | Ученая степень, звание | Подпись                                                                               | Дата     |
|-----------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Старший преподаватель | Гаврикова Надежда Александровна |                        |  | 31.05.16 |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность                 | ФИО                        | Ученая степень, звание | Подпись                                                                               | Дата     |
|---------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Кафедра ЭБЖ,<br>Профессор | Федорчук Юрий Митрофанович | Д. т. н.,<br>профессор |  | 26.05.16 |

По научно-техническим вопросам

| Должность              | ФИО                             | Ученая степень, звание | Подпись                                                                               | Дата    |
|------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Кафедра МТМ,<br>доцент | Мельников Александр Григорьевич | К. т. н.,<br>доцент    |  | 1.06.16 |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Зав. кафедрой | ФИО                        | Ученая степень, звание | Подпись                                                                               | Дата |
|---------------|----------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ЛиСТ          | Яковлев Алексей Николаевич | К. ф.-м. н.,<br>доцент |  |      |

Томск – 2016 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

| Код результата                      | Результат обучения<br>(выпускник должен быть готов)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Требования ФГОС ВО,<br>критериев и/или<br>заинтересованных сторон                                                                                                                                      |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Профессиональные компетенции</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                        |
| P1                                  | Способность формулировать цели, задачи и составлять план научного исследования в области светотехники и фотонных технологий и материалов, способность строить физические и математические модели объектов исследования и выбирать алгоритм решения задачи                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Требования ФГОС ВО (ОК-1, ОПК-1, ПК-1, 2, 10)<br>Критерий 5 АИОР (пп. 5.2.1-5.2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .<br>Требования работодателей. |
| P2                                  | Способность разрабатывать программы экспериментальных исследований, применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы, защищать приоритет и новизну полученных результатов исследований в области обработки, изучения и анализа фотонных материалов, корпускулярно-фотонных технологий, оптоволоконной техники и технологии, в области оптических и световых измерений, люминесцентной и абсорбционной спектроскопии, лазерной техники, лазерных технологий и оборудования, взаимодействия излучения с веществом, производства и применения светодиодов | Требования ФГОС ВО (ОПК-2, ПК-3, 4, 5, 19)<br>Критерий 5 АИОР (пп. 5.2.3, 5.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i><br>Требования работодателей.     |
| P3                                  | Способность к исследованию и анализу состояния научно-технической проблемы, технического задания, к постановке цели и задач проектирования в области светотехники, оплотехники, фотонных технологий и материалов на основе подбора и изучения литературных и патентных источников. Способностью к разработке структурных и функциональных схем оптических, оптико-электронных, светотехнических приборов, лазерных систем и комплексов с определением их физических принципов работы, структуры и технических требований на отдельные блоки и элементы                                                  | Требования ФГОС ВО (ПК- 6, 7, 10)<br>Критерий 5 АИОР (пп. 5.2.5, 5.2.4, 5.2.8), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i><br>Требования работодателей.       |
| P4                                  | Способность к конструированию и проектированию отдельных узлов и блоков для осветительной,                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Требования ФГОС ВО (ПК- 8, 9, 10, 11)<br>Критерий 5 АИОР (пп. 5.2.5, 5.2.4,                                                                                                                            |

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                   |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | облучательной, оптико-электронной, лазерных техники, оптоволоконных, оптических, оптико-электронных, лазерных систем и комплексов различного назначения, осветительных и облучательных установок для жилых помещений, сельского хозяйства, промышленности                                                       | 5.2.10), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i><br>Требования работодателей.                                                                                         |
| P5  | Способность к разработке и внедрению технологических процессов и режимов сборки оптических и светотехнических изделий, к разработке методов контроля качества изготовления деталей и узлов, составлению программ испытаний современных светотехнических и оптических приборов и устройств, фотонных материалов. | Требования ФГОС ВО (ПК-9, 12, 13, 14, 15, 16, 17, ПК-9)<br>Критерий 5 АИОР (пп 5.2.2, 5.2.8), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i><br>Требования работодателей.    |
| P6  | Способность эксплуатировать и обслуживать современные светотехнические и оптические приборы и устройства, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды                                                                               | Требования ФГОС ВО (ОПК-2, ПК-3, 11, 15, 16, 21)<br>Критерий 5 АИОР (пп 5.2.10, 5.2.16, 5.2.14), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i><br>Требования работодателей. |
| P7  | Способность проявлять творческий, нестандартный подход, требующий абстрактного мышления, при решении конкретных научных, технологических и проектно-конструкторских задач в области фотонных технологий и материалов и светотехники, нести ответственность за принятые решения                                  | Требования ФГОС ВО (ОК-1, 2, ОПК-1, 2, ПК-9)<br>Критерий 5 АИОР (п. 5.2.7, 5.2.9), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i><br>Требования работодателей.               |
| P8  | Способность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала                                                                                                                                                                                                                                | Требования ФГОС ВО (ОК-3).<br>Критерий 5 АИОР (п. 5.2.16), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i><br>Требования работодателей.                                       |
| P9  | Способность к инновационной инженерной деятельности, менеджменту в области организации освоения новых видов перспективной и конкурентоспособной оптической, оптико-электронной и световой, лазерной техники с учетом социально-экономических последствий технических решений                                    | Требования ФГОС ВО (ОПК-1, ПК-20, 22, 23), Критерий 5 АИОР (пп. 5.2.12, 5.2.14, 5.2.15), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i><br>Требования работодателей          |
| P10 | Способностью к координации и организации работы научно-производственного коллектива, принятию исполнительских решений                                                                                                                                                                                           | Требования ФГОС ВО (ПК- 18, 24), Критерий 5 АИОР (пп 5.2.11, 5.2.15), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-</i>                                                                           |

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                          |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | для комплексного решения исследовательских, проектных, производственно-технологических, инновационных задач в области светотехники и фотонных технологий и материалов                                                                                             | <i>ACE</i> и <i>FEANI</i><br>Требования работодателей.                                                                                                                   |
| P11 | Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности | Требования ФГОС ВО (ОПК-3)<br>Критерий 5 АИОР (5.2.13), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i><br>Требования работодателей. |

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



Институт физики высоких технологий (ИФВТ)  
 Направление подготовки (специальность): 12.04.02 Оптотехника  
 Кафедра Лазерной и световой техники (ЛИСТ)

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись, дата)

Яковлев А.Н.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

*Магистерской диссертации*

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

Студенту:

| Группа | ФИО                       |
|--------|---------------------------|
| 4ВМ41  | Макогону Ивану Сергеевичу |

Тема работы:

*Исследование очагов воздействия лазерного излучения на поверхности углеродистой стали*

Утверждена приказом директора (дата, номер)

*15.02.2015  
 № 1259/с*

Срок сдачи студентом выполненной работы:

12 июня 2016г.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Исходные данные к работе</b>                                               | Объект исследования: образцы углеродистой стали, изменение поведения образцов при механических испытаниях вследствие лазерной обработки.                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> | Аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки по вопросам: Обработки стали миллисекундными лазерными импульсами; параметры и микроструктура металла в очаге лазерного воздействия, влияние системы зависимых и независимых очагов на поведение образца при проведении механических испытаний (при растяжении образца.). |
| <b>Перечень графического материала</b>                                        | Диаграмма железо-углерод. Внешний вид образцов, оптическая схема облучательной головки, схемы механических испытаний, результаты                                                                                                                                                                                                                                    |

|                                                                                         |                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|                                                                                         | экспериментов.                                  |
| <b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>                       |                                                 |
| <b>Раздел</b>                                                                           | <b>Консультант</b>                              |
| <i>Финансовый менеджмент...</i>                                                         | Н.А. Гаврикова, ст. преподаватель каф. Менеджм. |
| <i>Социальная ответственность</i>                                                       | Ю.М. Федорчук, профессор каф. ЭБЖ               |
| <i>Раздел на иностранном языке</i>                                                      | А.Л. Ботова, ст. преподаватель каф. ИЯФТ        |
| <i>Научно-технические вопросы</i>                                                       | А. Г. Мельников, доцент, зав. кафедрой МТМ      |
| <b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b> |                                                 |
| <i>Laser radiation interaction with metals</i>                                          |                                                 |
|                                                                                         |                                                 |
|                                                                                         |                                                 |

Дата выдачи задания на выполнение выпускной  
квалификационной работы по линейному графику

20.11.2014г.

Задание выдал руководитель:  
доцент каф. ЛИСТ Зыков И.Ю.

 20.11.2014г.

Задание принял к исполнению студент:  
магистрант гр.4ВМ41 Макогон И.С.

 20.11.2014г.

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 97 страниц, 21 рисунок. 31 таблица, 15 источников, одно приложение.

Ключевые слова: Лазер, термическая обработка, углеродистая сталь,

Объект исследования – структура и свойства углеродистой стали после лазерного воздействия.

Целью данной магистерской диссертации является исследование очагов воздействия лазерного излучения на поверхности углеродистой стали.

В процессе работы проводился: литературный обзор, постановка задач, подбор оборудования, проведение экспериментов на растяжение стальных образцов.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word и выложен в систему ЭБС.

## Оглавление

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение                                                                    | 10 |
| 1. Термообработка металлов                                                  | 11 |
| 1.1 Способы термообработки                                                  | 11 |
| 1.2 Технологии лазерной термообработки металлов                             | 12 |
| 1.3 Лазеры, применяемые для термообработки                                  | 16 |
| 2. Взаимодействие излучения с металлами                                     | 20 |
| 2.1 Оптические свойства металлов                                            | 20 |
| 2.2 Плавление и испарение металлов                                          | 22 |
| 3. Макроскопическая физика пластической деформации металлов                 | 26 |
| 3.1 Стадийность пластического течения и автоволны<br>локализации деформации | 26 |
| 3.2 Механика пластического течения и разрушения в металле                   | 30 |
| 4. Экспериментальное оборудование и материалы                               | 33 |
| 4.1 Лазерный комплекс                                                       | 33 |
| 4.2 Исследуемый материал                                                    | 34 |
| 4.3 Определение микротвердости металлографический анализ                    | 34 |
| 4.4 Термическая обработка образцов                                          | 34 |
| 4.5 Установка и метод механических испытаний                                | 38 |
| 5. Влияние очагов лазерного упрочнения на пластическую деформацию           | 40 |
| 5.1 Диаграмма нагружения                                                    | 40 |
| 5.2 Картина локализации                                                     | 41 |
| 5.3 Результаты исследования                                                 | 44 |
| 6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение          | 49 |
| 6.1 SWOT- анализ                                                            | 49 |
| 6.2 Инициация проекта                                                       | 54 |
| 6.3 Планирование управления научно-техническим проектом                     | 57 |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7. Социальная ответственность                                                  | 68 |
| 7.1 Анализ выявленных факторов проектируемой<br>производственной среды         | 68 |
| 7.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой<br>производственной среды | 75 |
| Заключение                                                                     | 82 |
| Список публикаций                                                              | 83 |
| Список используемых источников                                                 | 84 |
| Приложение А. Laser radiation interaction with metals                          | 87 |

## Введение

Актуальность: В настоящее время актуальным являются вопросы повышения надёжности и долговечности машин, приборов, установок, повышение их качества и эффективности работы. Решение этих проблем прежде всего связано с упрочнением поверхностных слоёв изделий.

Лазерная термическая обработка, в отличие от других процессов термоупрочнения, таких как: закалка токами высокой частоты, электронагрев, закалка из расплава, является не объемным, а поверхностным процессом. При этом особенностью лазерного излучения являются высокая плотность энергии, малое время воздействия излучения, которые обеспечивают высокую скорость, как нагрева, так и охлаждения обрабатываемой поверхности.

Благодаря своим возможностям локального воздействия, лазерные технологии востребованы для придания нужных свойств, к примеру, большим деталям машин, для которых применение печей является трудоемкой и иногда не выполнимой задачей. Однако точечная лазерная обработка, и её влияние на структуру поверхности до сих пор остается малоизученным процессом.

Целью данной магистерской диссертации является исследование очагов воздействия лазерного излучения на поверхности углеродистой стали.

Для успешной реализации поставленной цели будут решаться следующие задачи:

- 1) Исследование литературы по термической обработке и влиянию лазерного излучения на поверхности углеродистой стали;
- 2) Исследование микроструктуры очагов воздействия лазерного излучения на поверхности углеродистой стали;
- 3) Исследование влияния матрицы очагов воздействия лазерного излучения на свойства стали при растяжении;

Объект исследования – структура и механические свойства углеродистой стали после лазерного воздействия.

Предмет исследования – вариации размеров и размещения матрицы очагов лазерного воздействия при растяжении металла.

## 1. Термообработка металлов

### 1.1 Способы термообработки

Термообработка, процесс для повышения стойкости к внешним факторам, тепловой и коррозионной стойкости деталей с высокой стоимостью, включает в себя либо полную, либо частичную закалку [1]. Обычно в таких случаях используют методы, основанные на диффузии (цементация, азотирование, нитроцементации), низкоуглеродистую сталь нагревают в объеме, внешне дополнительно подают углерод и другие легирующие элементы для дальнейшего диффундирования в поверхностном слое, а затем материал подвергают быстрому охлаждению на воздухе, в воде или масле для получения необходимой твердости. Селективное упрочнение заключается преимущественно в захвате диффундирующего свободного углерода в стали во время быстрого нагрева, что повышает твердость материала сильнее, чем после обычных фазовых превращений. Для достижения избирательной закалки обычно используют методы с использованием индукции, пламени, дуги. На самом деле каждый из таких методов имеет серьезные недостатки, такие как плохая воспроизводимость, необходимость вспомогательной закалки, экологические проблемы, более глубокое термическое проникновение, нерегулируемые искажения и длительный процесс установки времени необходимого режима для обработки (таблица 1). Высокий уровень искажений и длительный процесс установки времени также являются одними из недостатков традиционных процессов термообработки. Лазерная термообработка включает как интенсивный нагрев, так и быстрое самоохлаждение, которые делают локализованные поверхности устойчивыми к теплу, износу, усталости, разрушению, эрозии и коррозии. В случае лазерного термоупрочнения материал и энергия используются эффективно, что также увеличивает долговечность службы частей с высокой добавленной стоимостью [2].

Таблица 1 – Сравнение техник термообработки

| Обработка                      | Лазер   | Электронный пучок | Индукционная закалка | Науглероживание | Пламя   | Дуга    |
|--------------------------------|---------|-------------------|----------------------|-----------------|---------|---------|
| Макс. глубина обработки, мм    | 1,5     | 1                 | 5                    | 3               | 10      | 10      |
| Деформация                     | низкая  | низкая            | средняя              | средняя         | сильная | средняя |
| Эластичность материала         | высокая | высокая           | средняя              | низкая          | средняя | средняя |
| Точность                       | высокая | высокая           | средняя              | средняя         | низкая  | низкая  |
| Квалифицированное обслуживание | среднее | среднее           | среднее              | среднее         | высокое | высокое |
| Влияние на окружающую среду    | низкое  | низкое            | низкое               | высокое         | среднее | среднее |
| Необходимость закали           | нет     | нет               | иногда               | нет             | да      | нет     |

## 1.2 Технологии лазерной термообработки металлов

Процессы плавления и испарения металлов с помощью лазеров лежат в основе многочисленных технологических процессов в области металлообработки. Это лазерная сварка и лазерная термообработка поверхностей, пробивание отверстий, раскрой листовых материалов. Особенными отличиями лазерных технологий являются предельно высокая

пространственная локализация воздействия, короткая длительность воздействия, позволяющая ограничить зону теплового воздействия, бесконтактность, а так же возможность определять количество воздействия.

Применяемый в практике термин “лазерное упрочнение” включает в себя, как правило, широкий спектр физических процессов, протекающих вследствие лазерного термического воздействия на материалы и сплавы. Интенсивный лазерный поток поглощается приповерхностным слоем и приводит к структурным изменениям, зависящим от режимов лазерной обработки и физических свойств обрабатываемых материалов. Поэтому термин “лазерное упрочнение” следует понимать как процесс целенаправленного изменения структурно-чувствительных механических свойств материалов и сплавов посредством лазерного термического воздействия. Основываясь на том, что большинство механических свойств структурно-чувствительны, следует обращать особое внимание на закономерности структурообразования при вариациях условий и режимов лазерной обработки.

Любая термическая обработка заключается в нагреве сплавов при различных температурах и охлаждении их с разными скоростями. При этом изменяются фазовое состояние и структура сплавов и, вместе с тем, в широких пределах изменяются их физические и механические свойства. Энергетические параметры лазерного воздействия (плотность мощности, длительность воздействия, коэффициент поглощения лазерного излучения поверхностью) и физические свойства обрабатываемого материала (коэффициент температуропроводности, коэффициент диффузии в твердой фазе) определяют тепловые и диффузионные процессы, приводящие к тем или иным структурным изменениям и фазовым превращениям. В зависимости от степени теплового влияния на приповерхностные слои лазерное упрочнение подразделяется на отжиг, гомогенизацию, отпуск, лазерную закалку, перекристаллизацию (или оплавление поверхности), высокоскоростную перекристаллизацию. На рисунке 1.1 представлены основные энергетические параметры перечисленных процессов.

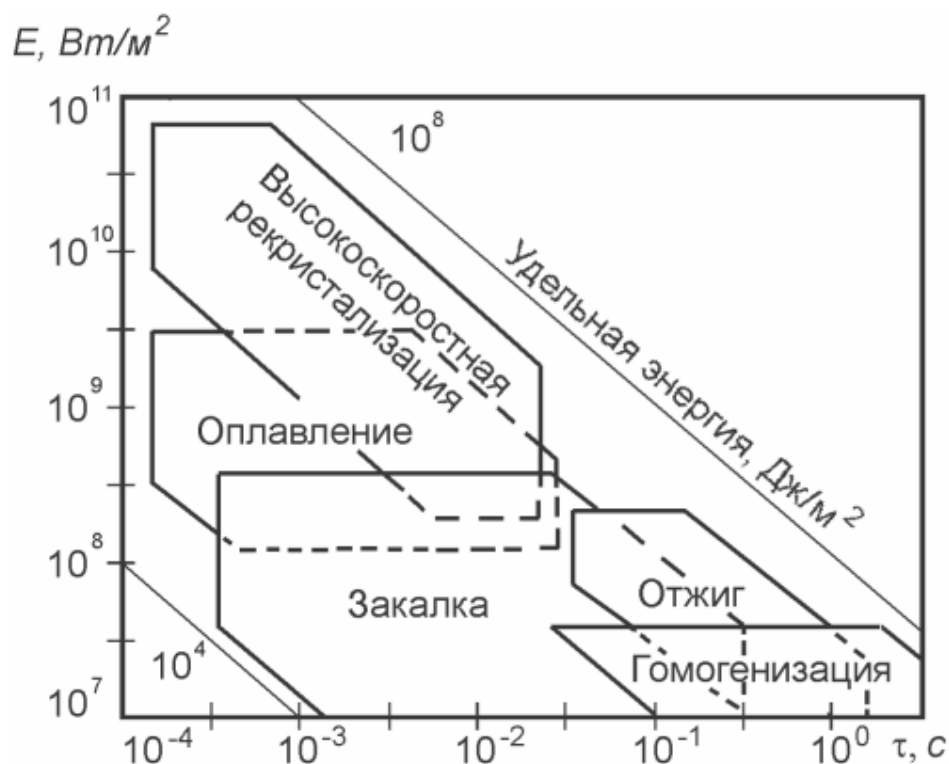


Рисунок 1.1 – Диаграмма видов лазерных технологий по энергетически — временным параметрам ( $E$  — плотность мощности,  $\tau$  — длительность воздействия)

Отметим особенности протекания приведенных на рисунке 1.1 процессов в условиях высокоскоростного лазерного нагрева. Гомогенизация и соответствующий ей отжиг — процесс, который в практике термической обработки используется для устранения неоднородностей. Лазерная гомогенизация чаще всего используется как первый этап лазерной обработки с целью уменьшения структурных неоднородностей в приповерхностных слоях.

Отпуск — процесс нагрева закаленной стали, при котором распадаются мартенсит и остаточный аустенит. В структуре стали при скоростном лазерном отпуске следует ожидать получения очень мелких карбидов ввиду кратковременности воздействия. Поэтому после лазерного отпуска, по сравнению с печным отпуском, сталь имеет более высокую прочность, твердость, ударную вязкость, меньшую хрупкость.

Закалка. Термин “лазерная закалка” применительно к железоуглеродистым сплавам широко используется в современной литературе,

обобщая в себе, как правило, весь диапазон видов лазерной термической обработки, т.е. лазерного термоупрочнения. Характерной чертой лазерной закалки является высокая скорость нагрева и охлаждения порядка  $10^2 — 10^8$  К/с.

Высокая скорость охлаждения при превращении высокотемпературной фазы — аустенита в железоуглеродистых сплавах приводит к сильному переохлаждению последнего (около 600 К), в результате чего появляются метастабильные фазы, не учтенные на диаграмме фазового равновесия. Поэтому во всем энергетическом диапазоне лазерного упрочнения имеет место мартенситное превращение переохлажденного аустенита, что и обуславливает появление закалочных структур в зоне лазерного воздействия углеродистых сталей.

Оплавление поверхности применяют для реализации следующих целей. Во – первых, с целью увеличения толщины упрочненного слоя при лазерной закалке и, во – вторых, с целью изменения микрогеометрии поверхностного слоя. Увеличение качества поверхности при помощи лазерного оплавления широко применяется для деталей из порошковых сплавов с целью улучшения микрорельефа поверхности и увеличения плотности поверхностного слоя. Однако при использовании такой технологии необходимо учитывать гидродинамическое перемешивание расплава под влиянием термокапиллярных сил. В районе оплавления возникают высокие градиенты поверхностного натяжения и, вследствие этого, образуется циркуляционное движение в жидкости до 150 мм/с. Изменение давления внутри расплава требует компенсации, что искривляет поверхность жидкой ванны. Лазерная закалка с оплавлением поверхности чаще всего выполняется для увеличения толщины зоны лазерного воздействия. Однако микротвердость структурных слоев зоны оплавления может быть существенно ниже микротвердости в зоне отсутствия оплавления.

Высокоскоростная перекристаллизация — новейший инструмент для формирования метастабильных фаз в твердых растворах систем сплавов,

позволяющий получить структурное состояние, существенно отличающееся от равновесных условий кристаллизации. К примеру, было представлено, что при быстрой кристаллизации вероятно возникновение ячеистых, полосчатых и химически однородных микроструктур. Также такие процессы применяются для получения микроструктур с более равномерным распределением примеси. Высокоскоростная кристаллизация охватывает скорости роста структур в диапазоне от  $10^{-2}$  до  $10^2$  м/с (получено глубоким переохлаждением материалов). В процессах лазерной высокоскоростной кристаллизации скорость движения границы раздела фаз достигает 4 м/с, что существенно выше определенных пределов, достигнутых при кристаллизации отливок, и сравнима со скоростями кристаллизации, достигнутыми методами электромагнитной левитации. При таких скоростях роста равновесные процессы на границе раздела фаз не имеют места, и следует рассматривать процессы структурообразования с точки зрения формализма локально неравновесной кристаллизации. При скоростях движения границы раздела фаз свыше 1 м/с для сталей описание массообменных процессов вблизи фронта кристаллизации возможно только с учетом характерного эффекта локально–неравновесной кристаллизации — диффузионной релаксации растворенных компонентов примесей в сплавах.

### 1.3 Лазеры, применяемые для термообработки

В последние три десятилетия в области термообработки были хорошо известны три различных типа лазерных источников:  $\text{CO}_2$ , Nd: YAG и диодные лазеры высокой мощности. До конца прошлого века  $\text{CO}_2$ -лазер был чуть ли не единственным лазером, который был способен обеспечить сочетание плотности мощности и времени взаимодействия излучения с веществом, необходимого для появления упрочнения. С конца 1990-х развитие Nd: YAG лазеров с мощностью в несколько киловатт с накачкой лампой-вспышкой или диодной накачкой обеспечило появление альтернативного источника с рядом преимуществ. Одним из основных преимуществ Nd: YAG лазера является то, что длина волны лазерного излучения (обычно 1,06 мкм) позволяет лазерным

лучам быть доставленными посредством оптического волокна с относительно низкими потерями энергии. Это позволяет тракту, по которому проходит излучение, быть изогнутым на пути к мишени. Следовательно, Nd: YAG лазеры, обеспечивающие высокие уровни мощности лазера, могут быть применены в составе с манипулирующим роботом, что делает их идеальными для трехмерной обработки. Гораздо позже были изобретены киловаттные диодные лазеры с длиной волны около 0,8 мкм; они компактны и могут быть установлены непосредственно на роботе для упрочнения компонентов со сложной геометрией. По сравнению с длиной волны CO<sub>2</sub>-лазера (около 10,6 мкм), длины волн света из Nd: YAG и диодных лазеров значительно сильнее поглощаются на поверхности металла [3].

В результате Nd: YAG и диодные лазеры были применены в области различных обработок сталей и их сплавов.

В течение последнего десятилетия разработки в области волоконных лазеров высокой мощности сильно продвинулись вперед. Из лабораторных наборов, доставляющих излучение с милливаттной выходной мощностью в начале 1990-х, волоконные лазеры развились в лазерные комплексы мощностью до нескольких киловатт для использования в промышленной обработке материалов [4]. В основе эволюции волоконных лазеров лежат две технические разработки: промышленная оптическая связь создала первые технологии для повышения пропускной способности одномодовых волокон, а промышленная оптоэлектроника сделала мощнее лазерные диоды, необходимые для накачивания волокон. Высокий уровень мощности волоконного лазера в значительной степени зависит от наличия надежных и долговечных систем диодной накачки.

Таблица 2 – Сравнение высокомоуных лазерных комплексов

| Фактор                             | CO <sub>2</sub> | Nd: YAG         | Диодный         |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Длина волны, мкм                   | 10,6            | 1,06            | 0,808           |
| Поглощение металлами, %            | 5-10            | 25-35           | 30-40           |
| КПД, %                             | 10              | 10              | 30              |
| Средняя потребляемая мощность, кВт | 50              | 30              | 10              |
| Мощность лазера, кВт               | 5               | 8               | 3               |
| Максимальная плотность мощности    | 10 <sup>8</sup> | 10 <sup>9</sup> | 10 <sup>6</sup> |

Для локализованного упрочнения в настоящее время используют Nd: YAG и диодные лазеры, поскольку они сочетают в себе более высокий КПД и лучшее поглощение металлами из-за работы в более коротковолновом диапазоне длин волн, а также эти лазеры имеют малые затраты на обслуживание (таблица 2).

На рисунке 1.2 показано поглощение лазерного излучения на разных длинах волн для различных металлов [5]. Так как различные виды сталей поглощают излучение CO<sub>2</sub> лазера с довольно низкой эффективности (около 2-5 процентов), на стали необходимо наносить поверхностное покрытие до обработки, чтобы увеличить поглощение лазерного излучения. В то время как Nd: YAG, диодные и волоконные лазеры с диодной накачкой имеют могут быть поглощены сталями примерно на 35 процентов или даже выше и, следовательно, покрытие поверхности или другие виды предварительной обработки не нужны.

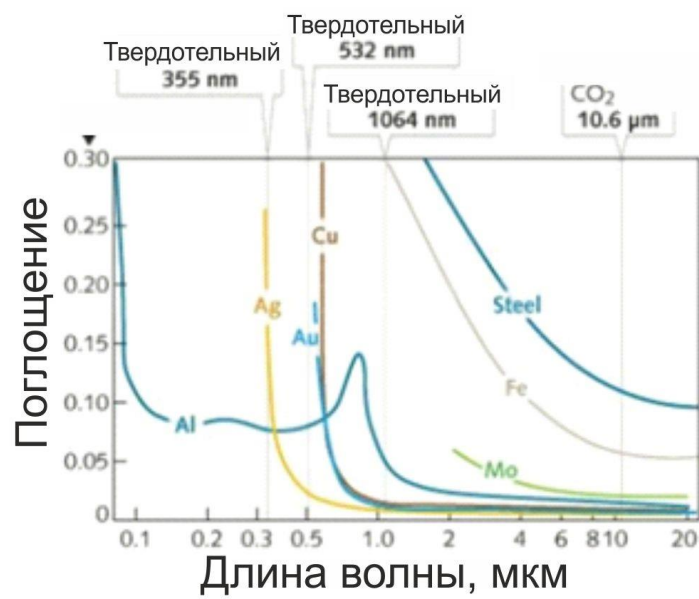


Рисунок 1.2 – Поглощение металлами лазерного излучения разных длин волн

## 2 Взаимодействие излучения с металлами

Для описания воздействия лазерного излучения на металлы, полупроводники и диэлектрики принято выделять несколько стадий: нагрев без фазового перехода; плавление и испарение; ионизация испаряемого вещества и образование плазмы.

### 2.1 Оптические свойства металлов

В инфракрасной и видимой части оптического диапазона металлы очень отражают падающее на них излучение. В результате взаимодействия света со свободными электронами в металлах, концентрация которых достигает  $10^{22}$  -  $10^{23}$  см<sup>-3</sup>, происходит интенсивное рассеяние света. Вторичные волны, формирующие сильную отраженную волну, создаются колебаниями электронов. Поглощение квантов света электронами проводимости вероятно лишь при условии их одновременных столкновениях с фононами, примесями, друг с другом, поверхностью металла, границами зерен и кристаллитов. В тонком приповерхностном слое, в котором затухает проникающее в металл излучение, из рассеянного света происходит столкновение и создание отраженной волны.

Распространение электромагнитных волн в однородной изотропной среде, обладающей проводимостью, исследуются с помощью уравнений Максвелла. При этом нужно учитывать, что внутри однородного проводника электрическое поле отсутствует. Для электрически нейтральных сред ( $\text{div } \vec{E} = 0$ ) уравнения Максвелла можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned}\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= 0, \\ \nabla^2 \vec{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} &= 0.\end{aligned}$$

Решение этих уравнений для плоской электромагнитной волны, распространяющихся в положительном направлении оси  $x$ , запишем в виде

$$\begin{aligned}E &= E_0 \exp(-k_i x) \exp(i(kx - \omega t)), \\ H &= H_0 \exp(-k_i x) \exp(i(kx - \omega t)).\end{aligned}$$

Тут учтено, что для проводящей среды волновое число следует заменить комплексным волновым числом:

$$k^2(\omega) = \omega^2 \varepsilon \mu - i \omega \sigma \mu = (k - ik_i).$$

Из решения уравнений для плоской электромагнитной волны следует, что по мере проникновения вглубь проводника амплитуды векторов убывают по экспоненциальному закону. Вследствие этого существенная часть электрического поля сконцентрирована близ поверхности проводника, толщина которого невелика (например, глубина проникновения меди не более 2 нм). По этой причине, рассказывать о распространении света в проводнике нецелесообразно.

Коэффициент отражения  $R$  электромагнитных волн поверхностью вещества и коэффициент пропускания  $T$  можно определить как отношение плотностей потока отраженной и проходящих волн. При учете поглощения энергии в приповерхностном слое можно получить уравнение

$$T + R + A = 1,$$

где  $A$  – поглощательная способность вещества.

Каждое из известных соотношений оптики диэлектриков возможно формально перенести в оптику металлов или других поглощающих сред элементарной заменой вещественных величин показателя преломления  $n$  и волнового вектора  $k$  на комплексные аналоги  $\tilde{n}$  и  $\tilde{k}$  соответственно.

Отраженные и поглощенные электромагнитные волны возникают вследствие процессов, протекающих внутри металла, а не на границе раздела. При этом доля падающего монохроматического излучения, для непрозрачных твердых тел, которое было поглощено телом, обуславливается его способностью к поглощению, тогда для случая нормального падения

$$A = 1 - R = \frac{4n}{(n + 1)^2 + k_p^2}.$$

Таким образом,  $A$  возможно подсчитать по измеренным данным оптических постоянных или комплексного показателя преломления.

Вследствие того, что излучение поглощается тонким приповерхностным слоем материала, для описания взаимодействия лазерного излучения с металлами можно использовать так называемую “тепловую модель”. В соответствии с этой моделью возможно подвергнуть анализу независимо друг от друга четыре стадии воздействия: переход поглощенной энергии в тепло и поглощение света; нагрев материалов без разрушения; разрушение и разлёт продуктов разрушения; остывание. Тепловая модель дала возможность удачно описать распространение тепла, плавление, модификацию структуры вещества [6].

## 2.2 Плавление и испарение металлов

Обратимся теперь к стадии плавления и испарения металлов. Разделять эти процессы нельзя, вследствие того, что упругость насыщенного пара стремительно растет при малом увеличении температуры над температурой плавления. Разбирая взаимосвязанный процесс плавление – испарение металлов, в соответствии с моделью последовательных стадий, не будем рассматривать процесс образования плазмы.

Стадия нагрева без изменения фазового состояния четко выделяется, особенно при температурах, во много раз ниже температуры плавления, но при этом стадию плавления выделить существенно труднее. Это связано с тем, что в промежутке, где изменяется температура от температуры плавления до кипения значительно быстро возрастает давление равновесного пара. Освежим в памяти, что температура кипения - это температура, при которой давление равновесного пара равно давлению окружающего газа. Таким образом, при условии, что плавление будет пороговым процессом, для осуществления которого нужна температура превышающая температуру плавления, то испарение не пороговый процесс, равновесное давление паров плавно и довольно быстро растет при увеличении температуры. Вследствие этого, если необходимо обозначить стадию плавления и можно не учитывать испарение, то нужно нагревать металл до температур, находящихся в довольно ограниченном диапазоне над температурой плавления.

Чтобы количественно определить нужны для реализации процесс плавления металлов параметры лазерного излучения, нужно учесть разнообразные данные и соотношения, которые характеризуют процесс плавления. В первую очередь нужно проанализировать изменение тепловых свойств металлов в двух фазах: твердой и жидкой. Удельная теплоемкость почти не изменяется, а теплопроводность снижается почти в 2 раза при плавлении металла. Таким образом, оценки по порядку величины можно сделать не учитывая эти изменения и воспользоваться данными для твердой фазы. Во-вторых, следует обязательно учесть, что это скрытая теплота плавления металлов. Она меняется на целый порядок величины во время перехода от легкоплавких к тугоплавким металлам. Чтобы почувствовать важность скрытой теплоты плавления, её необходимо сравнить с количеством тепла, необходимым для нагревания металла до температуры плавления. Молярная теплоемкость находится приблизительно на одном уровне для всех металлов. Из этого следует, что основную роль играет температура плавления, различие которой весьма заметно, начиная от  $300^{\circ}\text{C}$  для легкоплавких и до  $3000^{\circ}\text{C}$  для тугоплавких металлов. Следовательно, количество тепла, нужное для нагрева металла до температуры плавления, так же весьма различны. Сравнение этих величин обнаруживает, что чем ниже температура плавления металла, тем больше роль его скрытой теплоты плавления.

И третий фактор, который необходимо принимать к сведению, в часто встречаемой ситуации плавления металла излучением лазера в воздухе, – это окисление поверхности и обусловленное окислением, изменение коэффициента отражения излучения.

Строго описать процесс плавления довольно не просто, из-за того, что следует учитывать все описанные выше факторы в динамике, учитывая распределения лазерного излучения во времени и продвижения границы между твердой и жидкой фазами вглубь металла во время его нагревании. Плавление металлов излучением лазера обладает высоким значением для практики и

нынешней технологии металлообработки. Но при этом в условиях практической реализации плавления всегда одновременно реализуется и сильное испарение вещества [7].

Из приведенного выше, вытекает, что при небольшом превышении температуры металла над температурой плавления, испарение возможно пренебрежимо мало, а когда достигнет температуры кипения, тогда давление паров соответствует давлению окружающего его газа. Облако пара, которое появляется перед нагреваемой поверхностью на пути излучения, меняет качественно взаимодействие излучения лазера с металлом. Для начала, пары могут результативно поглощать излучение, экранируя поверхность, которую нагревают, от источника. Так же, есть вероятность ионизации паров под действием излучения, поэтому уже плазма будет поглощать излучение и экранировать, а не пары. Так же, в плазменном облаке есть возможность возникновения оптического пробоя.

Проанализируем процесс испарения не учитывая влияние образующегося пара на процесс распространения излучения от лазера до поверхности металла. Вместе с тем ограничимся умеренными интенсивностями излучения. Во время анализа процесса испарения металлов нужно с сразу различать стационарный и нестационарный режимы, осуществляющийся при использовании непрерывного и импульсного лазерного излучения. Разберем для начала нестационарный процесс. Зададим такую интенсивность излучения  $I$ , для которой металл нагреется в поглощающем слое до температуры выше температуры кристаллизации. Характер процесса испарения при этом будет зависеть от энергии  $Q$  и длительности  $\tau$  действия излучения. Пускай фиксирована энергия  $Q$ . Если значение  $\tau$  высоко, то тепло успеет распространиться за счет теплопроводности на большую глубину, температура не будет высока и следовательно небольшим будет количество испарившегося металла. Если  $\tau$  мало, то температура поверхности металла будет велика, но толщина нагретого слоя мала, что снова значит небольшое количество испаренного металла. Из этого следует, что эффект испарения будет

максимален при определенном среднем значении  $\tau$ . Не стоит забывать, глубина испарения является важной характеристикой для бесчисленных практических применений, потому что, это глубина отверстия (лунки), которую возможно сделать в металле, или толщина листового металла, в котором возможно сделать сквозное отверстие. Существуют две явные возможности увеличения глубины испарения: повышение интенсивности излучения и использование непрерывного излучения. Первая возможность ограничивается быстрым испарением и экранировкой металла парами, а вторая – типом применяемого лазера, так как достаточно высокую интенсивность  $I$  непрерывного излучения возможно получить только для некоторых лазеров. Во время использования излучения лазера для решения разнообразных технологических задач обычно используются непрерывное инфракрасное излучение  $\text{CO}_2$ -лазера и специальные приспособления, дающие возможность удалять пары металла и расплав по мере их образования. Если же мощность выбранного лазера невелика (твердотельные, оптоволоконные лазеры), то необходимо использовать режим модуляции добротности для получения низких значений времени импульса  $\tau$  [7].

### 3 Макроскопическая физика пластической деформации металлов

Исследование природы пластической деформации твердых тел за последние два десятилетия навело на важное заключение о том, что пластическое течение происходит неоднородно на каждом этапе. Возможно сказать, что микро-, мезо- и макроявления локализации являются важными для процессов пластического течения почти в одно время. Макролокализация присуща для всяких материалов и каждого условия нагружения, а фигуры очагов макролокализации и их кинетика обусловлены стадийностью кривой нагружения материала[8].

#### 3.1 Стадийность пластического течения и автоволны локализации деформации

Принципиальным автоволновым представлением о пластической деформации является вопрос о связи наблюдаемых на определенных стадиях деформационного упрочнения автоволновых картин с действующими на этих стадиях законами деформационного упрочнения. При поиске ответа на него на кривой течения  $\sigma(\epsilon)$ , аппроксимированной соотношением Людвики  $\sigma(\epsilon) = \sigma_0 + K\epsilon^n$ , выделялись стадии деформационного упрочнения с помощью условия  $n = (\ln \epsilon)^{-1} \{ \ln(\sigma - \sigma_0) - \ln K \} = \text{const}$ , где  $K$  — коэффициент упрочнения, а  $\sigma_0$  — константа. Результаты сопоставления стадий упрочнения и типов (мод) автоволн локализованной пластичности приведены в табл. 3. Из неё следует, что при пластической деформации наблюдаются только четыре макроскопические формы локализации. Каждая из них отвечает определённой стадии деформационного упрочнения и представляет собой одну из автоволновых мод. С этой макроскопической точки зрения пластическое течение может рассматриваться как эволюция автоволновых процессов, соответствующих стадиям деформационного упрочнения на кривой  $\sigma(\epsilon)$ , как показано на рисунке 3.1.

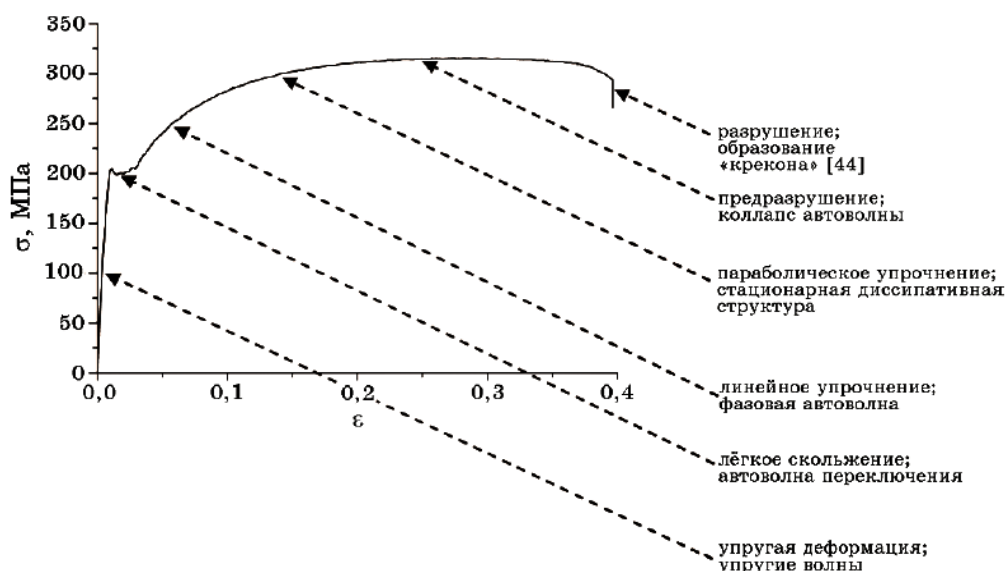


Рисунок 3.1 – Многостадийный процесс пластического течения как эволюция автоволновой картины

Иными словами, деформируемый растяжением с постоянной скоростью образец способен последовательно генерировать разные моды автоволновых процессов и служить универсальным генератором автоволн. Очевидно, он более удобен для моделирования таких процессов, чем традиционно используемые для этих целей химические реакторы, функционирующие в каждом режиме лишь при определённых температурах и составах реагирующих сред [9].

Таблица 3 – Стадии пластического течения и типы автоволн

| Стадия деформационного упрочнения                 | Значение показателя упрочнения $n$ в уравнении Людвига | Тип (мода) автоволнового процесса в соответствии с [10] |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Площадка текучести или стадия лёгкого скольжения  | $\sim 0$                                               | Автоволна переключения                                  |
| Стадия линейного деформационного упрочнения       | 1                                                      | Фазовая автоволна                                       |
| Стадия параболического деформационного упрочнения | 1/2                                                    | Стандартная диссипативная структура                     |
| Стадия предразрушения                             | $< 1/2$                                                | Коллапс автоволны                                       |

Обозначив стадии процесса и соотнеся каждую из них с данными о картинах локализации пластического течения, возможно сделать вывод о том, что каждому этапу течения соответствует определенный тип картины локализации, почти не зависящий от тонкостей механизма деформации и структуры деформируемого материала. Это утверждение легло в основу создания данного правила соответствия:

- Движение вдоль образца одного очага локализованной деформации соответствует стадии легкого скольжения и площадки текучести;

На данной стадии материал последовательно переводится из упруго напряженного в пластически деформированное состояние, так что на этой стадии в образце сосуществуют упругий и пластически деформированный объемы, разделенные движущимся фронтом Чернова – Людерса. На фронте Чернова – Людерса деформируемая среда необратимо переводится в новое состояние, характеризующееся большей дефектностью и способностью пластически деформироваться за счет движения дислокаций. Разгрузка деформируемого объекта не восстанавливает его первоначальных свойств.

- Передвижение по образцу с постоянной скоростью нескольких эквидистантных очагов локализации соответствует стадии линейного деформационного упрочнения;

Для линейного деформационного упрочнения характерна система равноудаленных, движущихся с постоянной скоростью очагов локализованной деформации, которая образует фазовую автоволну. Вязкость на данной стадии не изменяется, а скорость распространения автоволн локализованного течения постоянна.

- Появление в образце системы эквидистантно расположенных стационарных очагов локализации соответствует параболической стадии;

Процессы поперечного скольжения, характерные для этой стадии, ведут к лавинообразному росту плотности дефектов в очагах локализованной деформации, что вызывает рост дислокационной вязкости и уменьшает скорость перемещения очагов локализованной деформации вплоть до нуля.

- Взаимосогласованное движение локализованных очагов пластичности соответствует стадии предразрушения.

На стадии предразрушения очаги локализованной деформации снова начинают движение с постоянной для каждого из них скоростью. Однако на данной стадии их скорость зависит от координаты места зарождения каждого очага, при том, чем ближе это место к зоне будущего разрушения, тем медленнее такой очаг движется. Уже с начала этого этапа скорости движения очагов автоматически синхронизируются так, чтобы обеспечивался их одновременный “приход” в центр – “коллапс” автоволны, а место разрушения и время жизни образца до разрушения оказываются детерминированными явлениями, протекающими на более ранних этапах пластической деформации [11].

В то же время общепринятые дислокационные модели для последовательных стадий деформационного упрочнения, как и представленная выше модель, базируются на представлениях об изменениях распределения дислокационных субструктур, являющихся концентраторами напряжений, в деформируемой среде. При каждом таком изменении активная среда становится способной генерировать новую автоволновую моду. Таким образом, в основе деформационного упрочнения и генерации автоволн локализованного пластического течения лежат одни и те же механизмы. Этот вывод исключает контрверзу автоволновой модели и теорий деформационного упрочнения для разных стадий пластического течения и побуждает рассматривать их теперь как взаимно дополнительные.

Возможность противопоставить каждой стадии упрочнения строго определённый и единственный тип автоволнового процесса предполагает смену принципов анализа кинетики деформации, способствуя формированию новых аспектов в физике и механике многостадийного процесса эволюции пластического течения.

### 3.2 Механика пластического течения и разрушения в металле

Анализ металлических материалов с различной кристаллической структурой в статье [12] позволил авторам сформулировать следующие общие закономерности развития локализации пластического течения:

1) На линейных стадиях, независимо от типа кристаллической решетки, кривых нагружения металлов и сплавов появляются автоволны локализованной пластичности.

2) На параболических стадиях, соответствующих устойчивому деформационному упрочнению по Тейлору, картины макролокализации пластической деформации показаны стационарными пространственно-периодическими распределениями очагов локализации.

3) В материалах с ОЦК и ПГУ решеткой после тейлоровского параболического упрочнения замечаются переходные стадии, которые завершаются созданием макроскопической шейки с последующим развитием вязкого разрушения. Картины макролокализации, соответствующие этим стадиям, представляют собой системы подвижных очагов деформации, скорости которых тем больше, чем дальше они отстоят от места будущего разрушения. Положение последнего достаточно рано фиксируется одной зоной локализации, рождающейся в конце стадии тейлоровского упрочнения.

4) Формирование шейки вязкого разрушения начинается за долго до собственного разрыва и является результатом взаимосогласованного движения очагов локализованного пластического течения, приводящего к их ассоциации вблизи места разрыва.

5) Кинетические характеристики очагов локализованной пластичности на переходной стадии позволяют предсказать момент времени и координаты места разрушения образца[12].

Сильное влияние состояние поверхностного слоя на механическое поведение нагруженного твердого тела хорошо известно в литературе. Однако изначально это влияние связывали с изначальной дефектностью поверхностного слоя или формированием его дефектности из-за влияния

окружающей среды. Физическая мезомеханика выявила важную функциональную роль поверхностного слоя, которая связана с его пониженной сдвиговой устойчивостью.

Основополагающий тезис физической мезомеханики утверждает, что пластическое течение нагруженного твердого тела связано с потерей его сдвиговой устойчивости, которая формируется вследствие локальных структурных превращений в областях концентраторов напряжений на разных по масштабу уровнях. Поверхностный слой обладает террасно-ступенчатой структурой, в нем есть набор атомных конфигураций отличных от кристаллической структуры в объеме материала. Всё это дает возможность возникнуть в поверхностном слое локальных структурных превращений недислокационного типа при значительно низких напряжениях в сравнении с сопротивлением дислокационной деформации в объеме кристалла. Таким образом, в поверхностных слоях пластическое течение развивается автономно и опережает пластическую деформацию в объеме образца[13].

Помимо исследования влияния кристаллической структуры и поверхности, сотрудниками института физики прочности и материаловедения СО РАН были проведены исследования в области влияния нанесенных деформируемых покрытий на механику и закономерности пластической деформации.

Из исследований было показано, что поведение материала с поверхностно упрочненным слоем очень зависит от геометрии границы раздела подложки и покрытия. На плоской границе раздела возникают концентраторы напряжений, вызывающие появление в покрытии поперечных трещин, а так же вызывающие в подложке мезополосы локализованной деформации, которые распространяются по сопряженным направлениям максимальных касательных напряжений. При этом, с повышением толщины покрытия увеличивается расстояние между трещинами. При определенной степени деформации происходит самосогласование мезоконцентраторов напряжений, расположенных на противоположных сторонах поверхностно упрочненного образца.

Поперечные составляющие векторов смещения начинают проходить через всё сечение образца, что приводит к появлению локализация пластического течения. В дальнейшем развитие этой локализации в одном из сечений оказывается наиболее интенсивным, что приводит к разрушению образца.

Увеличение толщины покрытия влечёт за собой увеличение расстояния между трещинами, а так же непрерывное снижение пластичности образцов. А так же, в целом нанесение упрочняющих покрытий существенно изменяет характер пластического течения всей композиции[13].

На основании данных исследований, выдвинуто предположение, что изменяя локально свойства поверхности, вводя очаги упрочнения, можно повлиять на локализацию деформации, а так же попробовать изменить стадийность диаграммы нагружения. на примере полосы Людерса, ввиду того, что это наиболее хорошо известная локализация, а так же наиболее четко регистрируемая.

Для проверки данных предположений решено провести испытание на растяжение исходных и обработанных лазером стальных образцов.

Перед проведением испытаний необходимо определить:

- Тип стали для исследования;
- Испытательную машину для исследования;
- Методику по наблюдению локализации.

#### 4. Экспериментальное оборудование и материалы

Были разработаны опыты для исследования очагов упрочнения на поверхность углеродистой стали. Для выполнения опытов и достижения цели исследования были использованы ряд оборудования.

##### 4.1 Лазерный комплекс

В исследовании в качестве лазерного источника излучения использовался твердотельный Nd:YAG лазер (модель BlackLight), произведенный в ООО «Лазерный центр», г. Санкт-Петербург и представленный на рисунке 4.1. Лазер работает в импульсном режиме с длиной волны излучения 1,064 мкм. Максимальная пиковая мощность – 4 кВт, максимальная энергия импульса – 40 Дж, длительность импульса регулируется в пределах от 0.4 до 30 мс. Частоту следования импульсов возможно изменять от 4 до 20 Гц [14].



Рисунок 4.1 - Лазерный комплекс BlackLight

## 4.2 Исследуемый материал

В качестве материала для исследования была выбрана сталь марки У12 – инструментальная углеродистая сталь (содержание углерода 1,16 – 1,23%), Выбор материала обусловлен ценой и широким распространением в деталях машин, склонность высокоуглеродных сталей к закалке, а так же как материал, показавший лучшее значение микротвердости после лазерной закалки в предварительных исследованиях.

## 4.3 Определение микротвердости металлографический анализ

Твердость стали У12 в исходном (отожжённом) состоянии, измеренная по методу Бринелля.

Для определения микротвердости использовался прибор ПМТ 3.

Для проведения микроанализа на образцах готовились металлографические шлифы с помощью шлифовальных шкур с различным размером зерна абразива. Окончательную полировку проводили на сукне с применением алмазной пасты и пасты ГОИ. Структуру выявляли травлением 4% раствором  $\text{HNO}_3$  в этиловом спирте.

Анализ структуры выполняли с помощью исследовательского оптического микроскопа AxioObserver A1.m фирмы Carl Zeiss (Германия) в программном продукте AxioVision v.4.6.

## 4.4 Термическая обработка образцов

Эксперимент для исследования включал проведение точечной поверхностной лазерной закалки стали с заданными параметрами обработки, представленными в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры обработки

| Параметр              | Величина                  |
|-----------------------|---------------------------|
| Длительность импульса | 12 мс                     |
| Плотность мощности    | 23,4 кВт/ см <sup>2</sup> |
| Диаметр пятна         | 0,35 мм                   |

В качестве сырья были подготовлены образцы в виде прямоугольных лопаток размером 60х8х4 мм. Образцы обрабатывались при комнатной температуре (около 20 ° С). Угол между оптической осью и поверхностью составляет 90 градусов. Создание очагов упрочнения производилось в виде матрицы точек с обеих сторон заготовок. Вид матрицы представлен на рисунке 4.2. Защитные газы не применялись. После обработки тестируемые образцы охлаждались на воздухе.

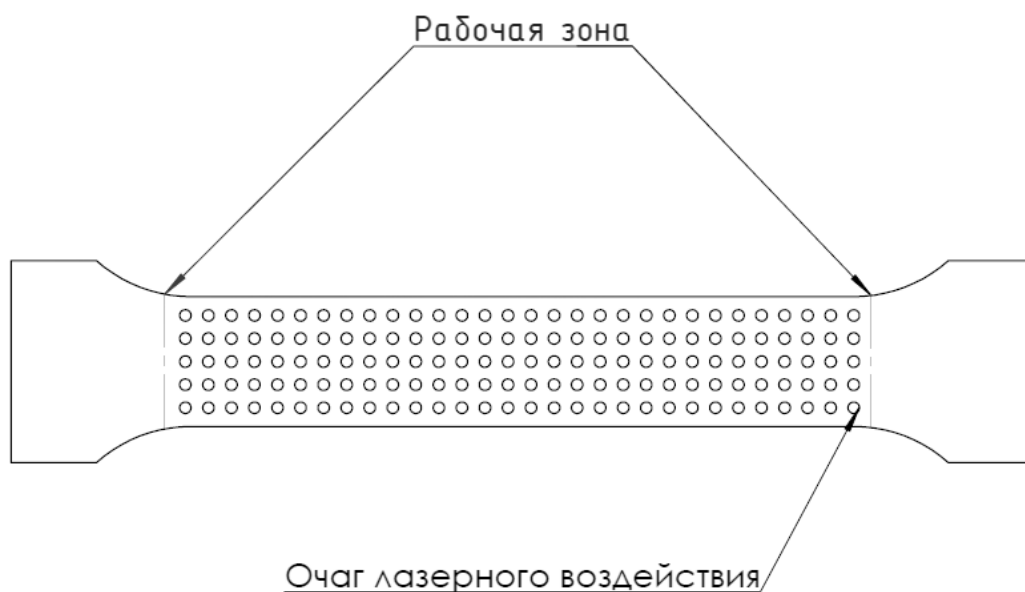
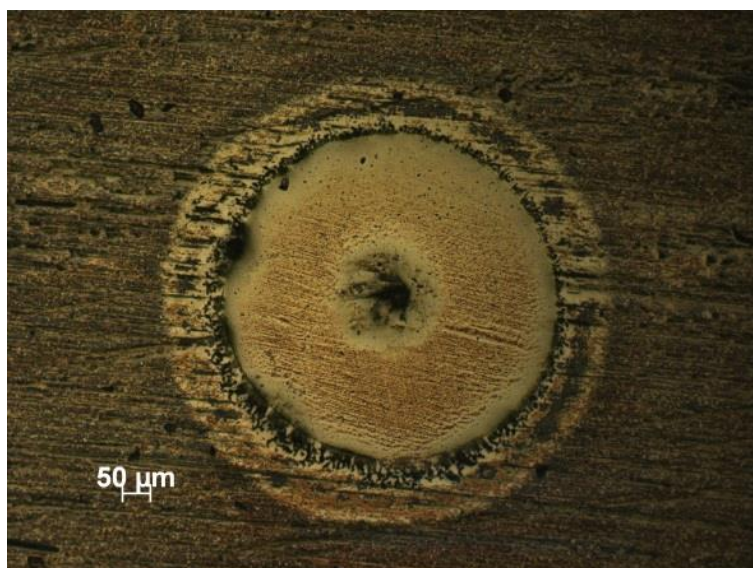


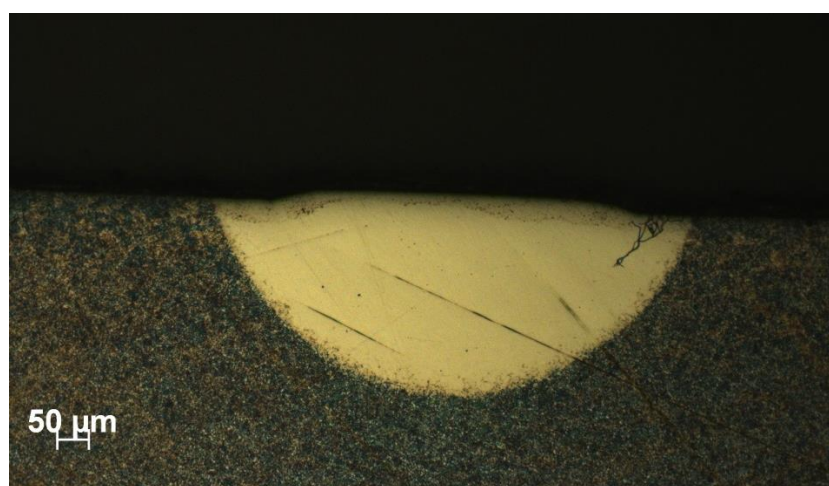
Рисунок 4.2 – Вид матрицы при термической обработке

Размер очагов упрочнения составляет 0,12 мм. Расстояние между очагами равно диаметру пятна. Длина рабочей поверхности 40 мм.

На рисунке 4.3 представлена фотография очага в матрице после лазерного воздействия.



а)



б)

Рисунок 4.3 – Очаг упрочнения:

а) вид сверху; б) вид в сечении

На фотографии хорошо видны зоны лазерного воздействия и зоны термического влияния. В зоне лазерного воздействия произошло оплавление материала образца, о чем свидетельствует отсутствие рисок, оставленных шлифовальным инструментом до лазерной обработки.

На рисунке 4.4 представлены результаты измерения микротвердости в области лазерного воздействия, а так же близ неё. Измерение производилось от центра очага упрочнения к краю образца.

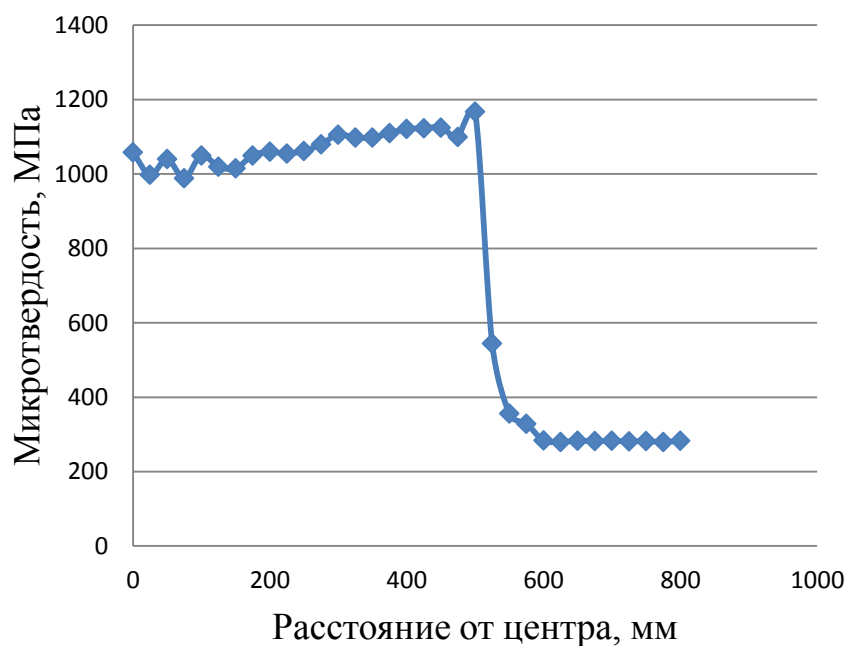


Рисунок 4.4 – Изменение микротвердости стали в области, подвергнутой лазерной обработке

Из него видно, что у стали У12 после лазерного термического воздействия микротвердость повысилась с 280 МПа до 1050 МПа. Зона, располагающаяся в промежутке от 450 до 500 мкм, является зоной термического влияния, где микротвердость выше, чем в зоне закалки, и составляет 1150 МПа. Небольшое снижение твердости в зоне лазерного воздействия обусловлено наличием остаточного аустенита. Наличие остаточного аустенита объясняется тем, что переход аустенита в мартенсит сопровождается увеличением объема. Мартенсит занимает больший объем, чем аустенит, из которого он образовался. Поэтому когда в стали остается небольшое количество аустенита, он подвергается со стороны мартенсита всестороннему сжатию, ввиду чего превращение аустенита в мартенсит прекращается. Аустенит в результате самопроизвольного превращения в мартенсит понижает твердость, износостойкость, нередко приводит к изменению размеров деталей, работающих при низких температурах. Однако, в данном случае наличие остаточного аустенита не критическое, для

превращения которого необходимо было бы производить дополнительную термическую обработку.

#### 4.5 Установка и метод механических испытаний

Для проведения экспериментов была использована универсальная испытательная машина серии LFM-125 кН, представленная на рисунке 4.5. Испытания проводились в институте физики прочности и материаловедения СО РАН, в городе Томск.



Рисунок 4.5 - Универсальная испытательная машина  
серии LFM-125 кН

Образцы в форме двусторонней лопатки фиксировались зажимами и подвергались одноосному динамическому растяжению.

Для исследования пластического формоизменения лопаток был использован метод двухэкспозиционной спекл-фотографии. Для изучения пластического формоизменения данный метод впервые был применен авторами статьи [15].

Данная методика дает возможность определять, с разрешением не менее 100 нм, передвижения в единицы микрометров любых точек объекта имеющих макроскопические размеры. Суть методики заключается в том, что при освещении высококогерентным световым пучком оптически матовых поверхностей возникает спекл-эффект. Движение освещаемой поверхности вызывает за собой смещение спекл-поля, что позволяет рассматривать спеклы, как оптические метки микронных размеров.

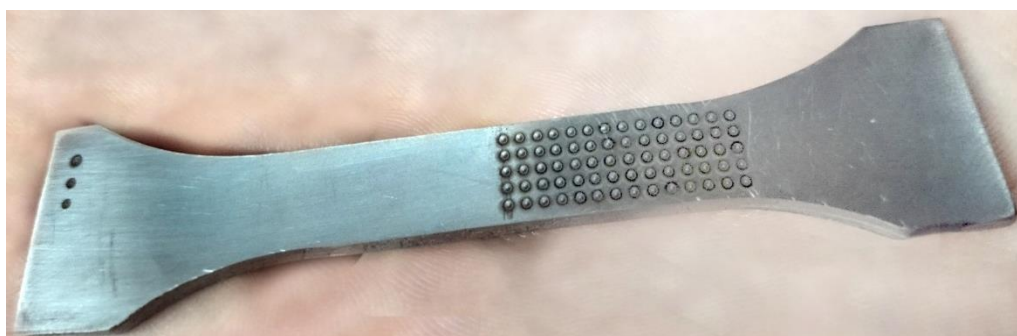
Деформируемый на испытательной машине образец, освещался расширенным посредством коллиматора пучком лазера, мощность которого составляла более 50 мВт, а полученное изображение в свою очередь записывалось длиннофокусной фотокамерой [15].

## 5. Влияние очагов лазерного упрочнения на пластическую деформацию

Исследование влияния очагов упрочнения на локализацию деформации проводилось на трех образцах из стали У12. Первый образец не подвергался лазерной обработке, и исполнял роль образца свидетеля. Второй образец был подвержен обработке на половину рабочей зоны, а третий – целиком. Изображение образцов представлены на рисунке 5.1.



а)



б)

Рисунок 5.1 – Образцы после лазерной обработки

а) обработанный целиком; б) обработанный на половину

После создания очагов упрочнения, образцы закреплялись поочередно в испытательной машине серии LFM и подвергались одноосному растяжению. Напротив была установлена система для регистрации пластического формоизменения материала подготовленных образцов. На половину обработанный образец закреплялся упрочненной частью к активному захвату.

### 5.1 Диаграмма нагружения

По результатам растяжения были построены три диаграммы нагружения, представленные на рисунке 5.2.

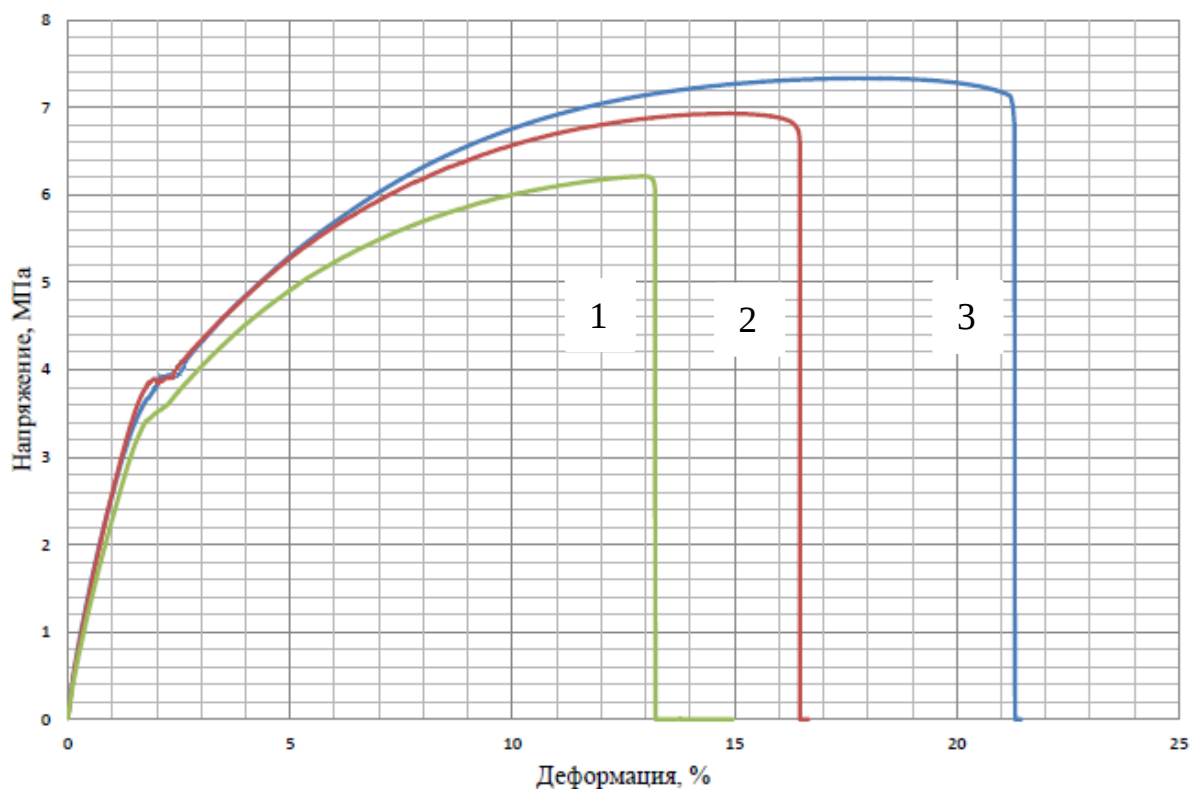


Рисунок 5.2 – Диаграммы растяжения образцов с различным типом обработки: 1 – обработанный целиком; 2 – обработанный на половину; 3 – без обработки

На диаграммах растяжения исходного и на половину обработанного образцов видны признаки наличия площадки текучести, в то время как в полностью обработанном образце она практически полностью отсутствует.

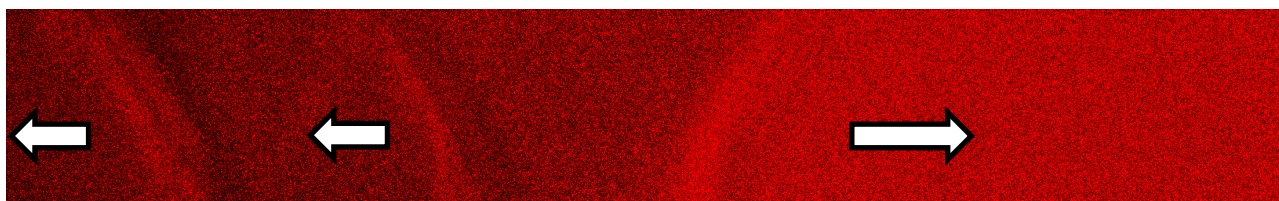
Так же на диаграмме прослеживается зависимость пластичности образца от количества очагов упрочения, при повышении их количества пластичность резко снижается.

Еще одна особенность выделяется на диаграмме полностью обработанного образца, это отсутствие стадии образования шейки, явно выделяющейся на диаграмме исходного образца.

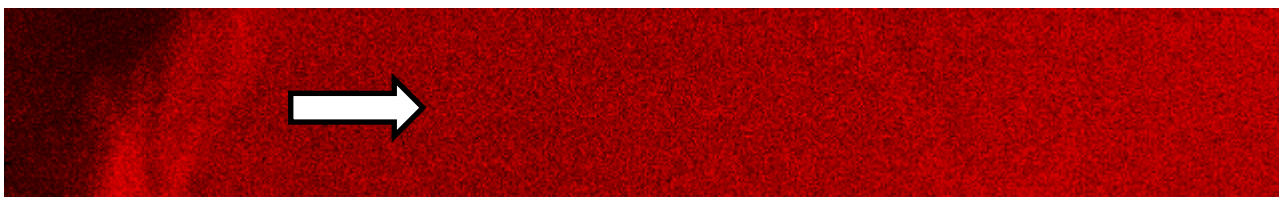
## 5.2 Картина локализации

В исследовании была получена серия двухэкспозиционных спеклограмм, охватывающая всю рабочую зону образца. Пассивный захват находился по левую сторону, а активный по правую сторону от спеклограммы.

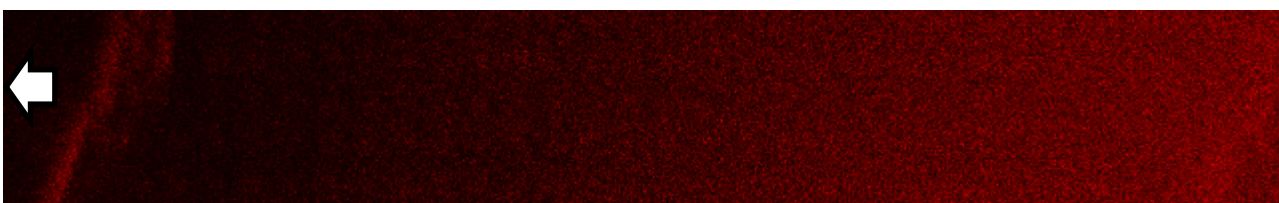
Пластическая деформация в образцах начинается с возникновения и движения в них полос Людерса, представленных на рисунке 5.3



а)



б)

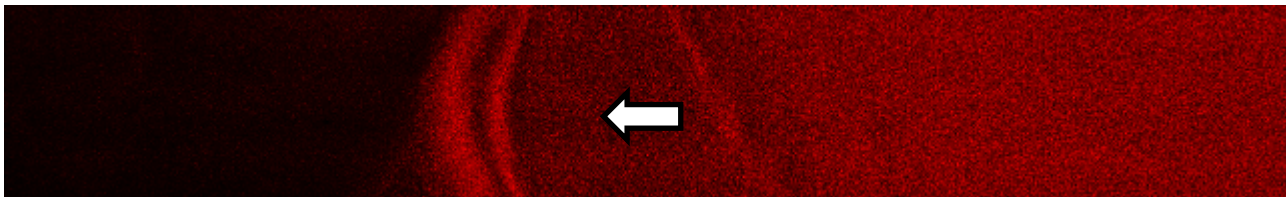


в)

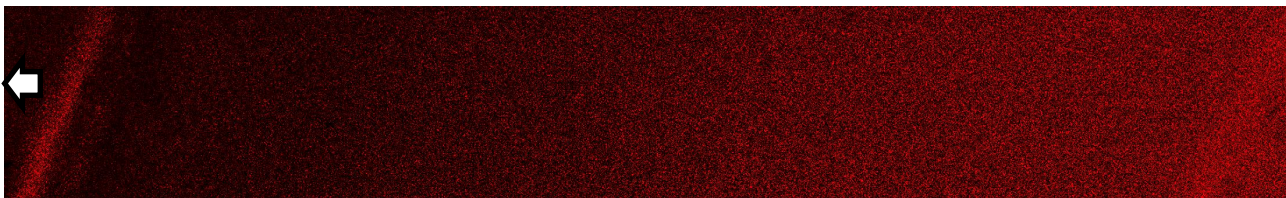
Рисунок 5.7 – Возникновение и направления движения полос Людерса в образцах: а – исходный; б – обработанный на половину; в – полностью обработанный;

Возникновение полос во всех образцах начинается на сотой секунде после начала растяжения. В исходном образце сразу образуется три полосы Людерса, свободно передвигающихся по всей длине образца. В дальнейшем, на спеклограмме не обработанного образца не происходит никаких изменений. Разрыв образца произошёл с образованием шейки в середине рабочей зоны.

В образце, обработанном наполовину, полоса зарождается у края необработанной стороны и начинает движение к центру образца (рисунок 5.3 б). Через 12 секунд после начала движения, на границе обработанной области сформировалась еще одна полоса Людерса,двигающаяся на встречу к первой (Рисунок 5.4а).



а)



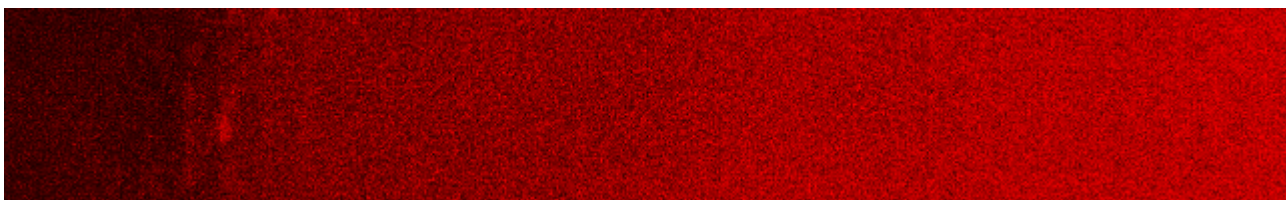
б)

Рисунок 5.4– Движение полос Людерса в образце (а,б)

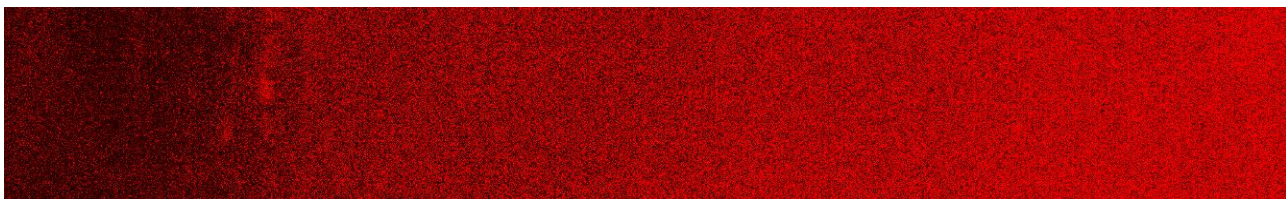
После схлопывания этих полос, на краях рабочей зоны, в необработанных областях, возникают еще две полосы,двигающиеся к захватам (Рисунок 5.4б).

В то же время, в полностью обработанном образце, смогла образоваться только одна полоса локализации на границе обработанной области, прошедшая к пассивному захвату (Рисунок 5.3в)

После этого, при дальнейшем повышении нагрузки в обработанных образцах, в зонах упрочнения начинали поочередно возникать трещины (Рисунок 5.5).



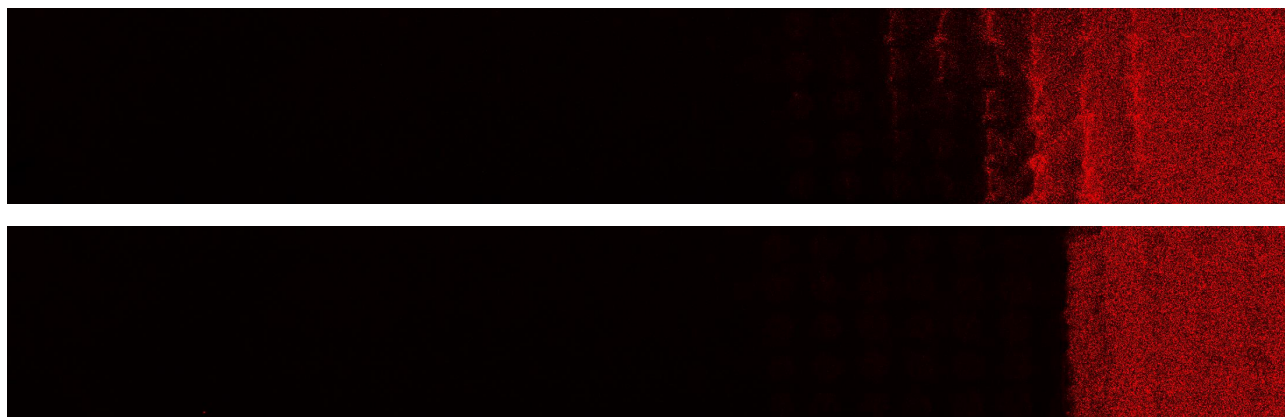
а)



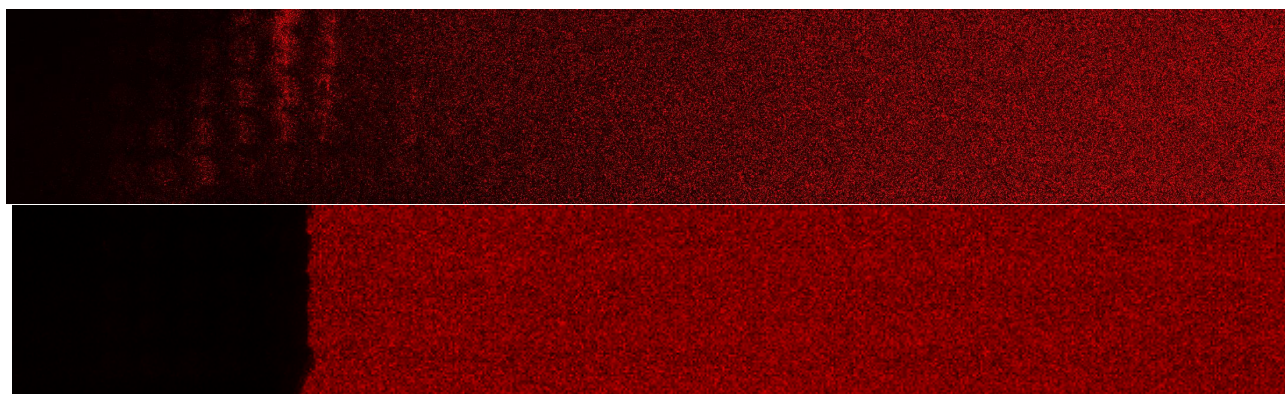
б)

Рисунок 5.5 – Появление трещин на спеклограмме (а,б)

В дальнейшем, во время повышения нагрузки, в очагах упрочения накапливались напряжения (Рисунок 5.6), что привело к разрыву образцов в полосе наибольшей концентрации.



а)



б)

Рисунок 5.6 – Места наибольшей концентрации напряжений перед разрывом и разрыв в обработанных образцах: а – на половину; б – полностью

### 5.3 Результаты исследования

Очаги упрочения – материал, отличающийся по свойствам от окружающего и имеющий по сравнению с размерами образца малый объем. В исследовании они показали себя как концентраторы напряжений, что говорит о том, что любые очаги являются зародышами разрушения, даже упрочняющие. Вид очагов упрочения, после эксперимента представлен на рисунке 5.7.

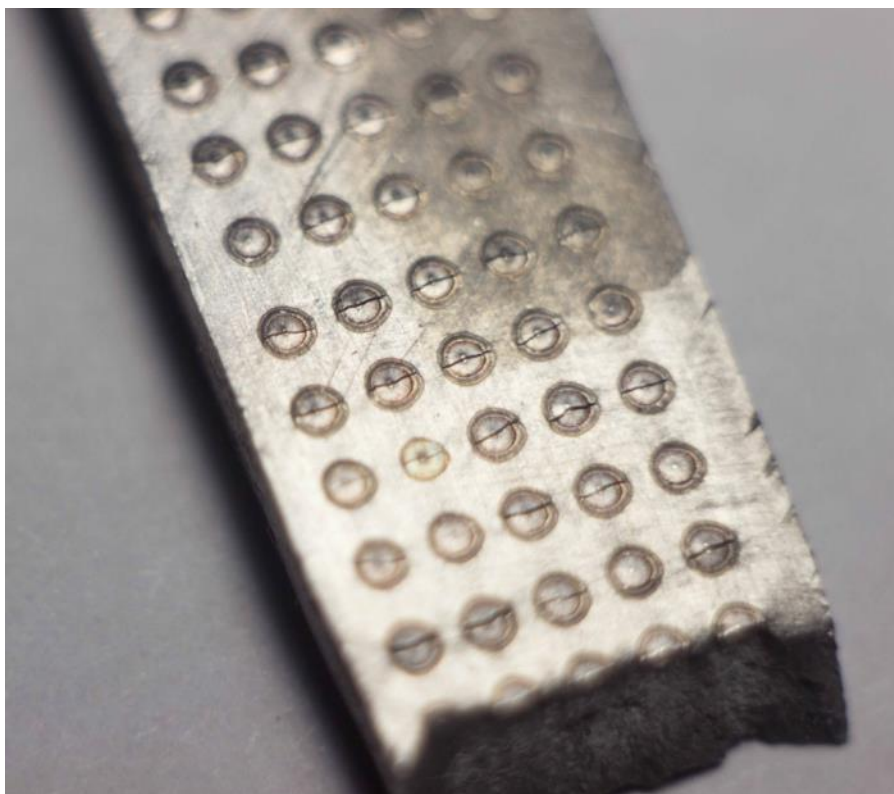


Рисунок 5.7 – Очаги упрочнения после проведения эксперимента

Ввиду высокой твердости и малой пластичности, очаги не деформировались, а в них возникла трещина, которая пошла вперед, но остановилась на границе обработанной и не обработанной области. Дальнейшее повышение напряжения привело к разрыву обработанных образцов по линии трещин в зоне наибольшей концентрации напряжений.

Главной особенностью навязанной образцу локализации состояла в том, что очаги локализации по общему объему гораздо меньше самого образца. На рисунке 5.8 хорошо видны как зоны без термического влияния, так и лазерного воздействия, в сечении площадь очагов составляют не более 5% от площади сечения образца.

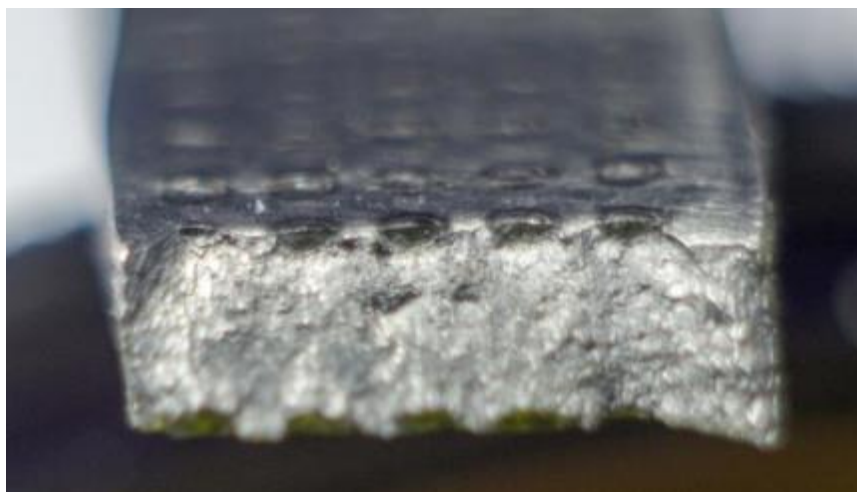


Рисунок 5.8 – Вид матрицы очагов упрочнения в сечении

Данный факт в совокупности с данными, полученными из диаграммы растяжения и спектрограммы, позволяет сделать несколько выводов:

- 1) Полоса Людерса не может пройти через область очагов упрочнения, что приводит к её подавлению;
- 2) Существенна роль поверхности в локализации деформации. Небольшая обработка на поверхности позволила существенно изменить поведение всего образца, не смотря на то, что он работает всем сечением;
- 3) За счет подавления локализации, достаточно сильно изменилась диаграмма нагружения, в целиком обработанном образце почти полностью удалось избавиться от стадии легкого скольжения, что косвенно указывает на то, что стадийность является следствием локализации деформации.

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

|                                           |                                                    |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Институт                                  | <b>ИФВТ</b>                                        |
| Направление подготовки<br>(специальность) | <b>Оптотехника</b>                                 |
| Уровень образования                       | Магистратура                                       |
| Кафедра                                   | <b>ЛИСТ</b>                                        |
| Период выполнения                         | осенний / весенний семестр 2015/2016 учебного года |

Студенту:

|               |                        |
|---------------|------------------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>             |
| 4ВМ4Б         | Макогон Иван Сергеевич |

Тема работы:

|                                                                                         |               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| «Исследование очагов воздействия лазерного излучения на поверхности углеродистой стали» |               |
| Утверждена приказом директора                                                           | Яковлев А. Н. |

Форма представления работы:

|                                 |
|---------------------------------|
| <b>Магистерская диссертация</b> |
|---------------------------------|

**ЗАДАНИЕ**

|                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»</b>                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Нормы и нормативы расходования ресурсов                                                                                         | <i>Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах</i>                                                                                                                                                  |
| <b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения | SWOT-анализ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 1. Разработка устава научно-технического проекта                                                                                | 1. Цели и результаты проекта<br>2. Организационная структура проекта<br>3. Иерархическая структура работ<br>4. Контрольные события проекта<br>5. План проекта                                                                                                                                                                               |
| 2. Планирование и формирование бюджета научных исследований                                                                     | Бюджет научно – технического исследования (НТИ)<br>1. Расчет материальных затрат НТИ<br>2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ<br>3. Основная заработная плата исполнителей темы<br>4. Отчисления на социальные нужды<br>5. Накладные расходы<br>6. Формирование бюджета затрат научно – исследовательского проекта |

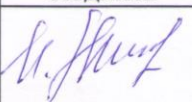
|                                                                                    |  |
|------------------------------------------------------------------------------------|--|
|                                                                                    |  |
| <b>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):</b> |  |
| 1. SWOT-анализ                                                                     |  |
| 2. Календарный график проведения исследования в виде диаграммы Ганта               |  |
| 3. Бюджет проекта                                                                  |  |

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

**Задание выдал консультант:**

| Должность             | ФИО                             | Ученая степень, звание | Подпись                                                                             | Дата    |
|-----------------------|---------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Старший преподаватель | Гаврикова Надежда Александровна |                        |  | 2.03.16 |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                    | Подпись                                                                             | Дата    |
|--------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 4ВМ4Б  | Макогон Иван Сергеевич |  | 2.03.16 |

## 6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

### 6.1 SWOT- анализ

SWOT-анализ – метод стратегического планирования, заключающийся в выявлении факторов внутренней и внешней среды организации и разделении их на четыре категории: Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы).

Он проводится в несколько этапов.

1) Первый этап - матрица SWOT (таблица 5). Он заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Таблица 5 - Матрица SWOT

|                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <p>Сильные стороны проекта:</p> <p>С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность</p> <p>С2. Экологичность технологии</p> <p>С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями</p> <p>С4. Локальность обработки деталей</p> <p>С5. Создание особых свойств поверхности, не доступных другим способом</p> | <p>Слабые стороны проекта:</p> <p>С1. Отсутствие отработанной технологии</p> <p>С2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой</p> <p>С3. Отсутствие постоянного доступа к необходимому оборудованию для проведения испытаний</p> <p>С4. Дороговизна установки для лазерной обработки</p> <p>Сл5. Большой срок поставок материалов и комплектующих, используемые при проведении научного исследования</p> |
| <p>Возможности:</p> <p>В1.Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2. Понижение стоимости лазерной установки</p> <p>В3. Повышение спроса</p> <p>В4.Повышение стоимости конкурентных разработок</p> <p>В5. Попадание в программу по обновлению оборудования на производстве</p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса</p> <p>У2. Введение дополнительных государственных требований к сертификации</p> <p>У3. Появление новых улучшенных технологий</p> <p>У4. Ограничения на экспорт технологии</p>                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

## 2) Второй этап

Второй этап - интерактивная матрица проекта (таблица 6). Выявление соответствия сильных и слабых сторон ЛСС внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить.

В случае, когда две возможности сильно коррелируют с одними и теми же сильными сторонами, с большой вероятностью можно говорить об их единой природе.

Таблица 6 – Интерактивная матрица «сильные стороны и возможности»

|             | Сильные стороны |    |    |    |    |    |
|-------------|-----------------|----|----|----|----|----|
| Возможности |                 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
|             | B1              | +  | +  | -  | -  | -  |
|             | B2              | +  | -  | +  | -  | -  |
|             | B3              | +  | 0  | +  | +  | +  |
|             | B4              | +  | -  | +  | -  | -  |
|             | B5              | +  | +  | +  | -  | 0  |

Таблица 7 – Интерактивная матрица «слабые стороны и возможности»

|             | Слабые стороны |     |     |     |     |     |
|-------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Возможности |                | Сл1 | Сл2 | Сл3 | Сл4 | Сл5 |
|             | B1             | +   | -   | +   | -   | +   |
|             | B2             | -   | -   | -   | +   | -   |
|             | B3             | +   | +   | -   | +   | -   |
|             | B4             | -   | -   | -   | 0   | -   |
|             | B5             | -   | +   | -   | +   | -   |

Таблица 8 – Интерактивная матрица «сильные стороны и угрозы»

|        | Сильные стороны |    |    |    |    |    |
|--------|-----------------|----|----|----|----|----|
| Угрозы |                 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
|        | У1              | +  | -  | +  | -  | -  |
|        | У2              | +  | +  | +  | -  | -  |
|        | У3              | 0  | -  | -  | -  | +  |
|        | У4              | -  | -  | -  | -  | -  |

Таблица 9 – Интерактивная матрица «слабые стороны и угрозы»

|        | Слабые стороны |     |     |     |     |     |
|--------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Угрозы |                | Сл1 | Сл2 | Сл3 | Сл4 | Сл5 |
|        | У1             | +   | +   | -   | +   | -   |
|        | У2             | -   | -   | -   | -   | -   |
|        | У3             | +   | -   | +   | -   | +   |
|        | У4             | -   | -   | -   | -   | -   |

### 3) Третий этап

Третий этап – итоговая матрица SWOT-анализа (таблица 10).

Таблица 10 - итоговая матрица SWOT-анализа

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <p>Сильные стороны проекта:</p> <p>С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность</p> <p>С2. Экологичность технологии</p> <p>С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями</p> <p>С4. Локальность обработки деталей</p> <p>С5. Создание особых свойств поверхности, не доступных другим способом</p> | <p>Слабые стороны проекта:</p> <p>С1. Отсутствие отработанной технологии</p> <p>С2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой</p> <p>С3. Отсутствие постоянного доступа к необходимому оборудованию для проведения испытаний</p> <p>С4. Дороговизна установки для лазерной обработки</p> <p>Сл5. Большой срок поставок материалов и комплектующих, используемых при проведении научного исследования</p> |
| <p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2. Понижение стоимости лазерной установки</p> <p>В3. Повышение спроса</p> <p>В4. Повышение стоимости конкурентных разработок</p> <p>В5. Попадание в программу по обновлению оборудования на производстве</p> | <p>Главным достоинством технологии является её заявленная экономичность и энергоэффективность, которые позволят поддерживать высокий спрос и конкурентноспособность на рынке</p>                                                                                                                                                       | <p>Главной слабостью проекта является дороговизна лазерной установки, необходимой для внедрения разрабатываемой технологии. Понижение её стоимости в будущем привело бы к повышению спроса на технологию</p>                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса</p> <p>У2. Введение дополнительных государственных требований к сертификации</p> <p>У3. Появление новых улучшенных технологий</p> <p>У4. Ограничения на экспорт технологии</p>                                                                         | <p>Возможные угрозы заключаются только в ведении дополнительных требований к сертификации системы. Ввиду новизны технологии, потребуется вложение средств для соответствия каждой сфере.</p>                                                                                                                                           | <p>Угрозой для проекта является появление новой улучшенной технологии. На фоне проблем с доступом к некоторому оборудованию для исследований и большим сроком поставок материала, эта проблема является очень актуальной.</p>                                                                                                                                                                                                                                   |

## 6.2 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации будут описаны изначальные цели и содержание. Показаны внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта. Основные моменты устава проекта будут описаны ниже по пунктам.

### 1) Цели и результаты проекта

Данные раздела сведены и представлены в таблице 11 и таблице 12.

Таблица 11 – Заинтересованные стороны проекта

| Заинтересованные стороны проекта                                      | Ожидания заинтересованных сторон                                              |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Научно-исследовательский институт физики прочности и материаловедения | Подтверждения результатов исследования по локализации пластической деформации |
| Предприятия машиностроительной отрасли                                | Готовая технология по обработке сталей лазерным излучением                    |

Таблица 12 – Цели и результаты проекта

|                                 |                                                                                                                  |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Цели проекта:                   | Исследовать влияние локальной обработки лазерным излучением на поверхность углеродистой стали                    |
| Ожидаемые результаты проекта:   | Получение положительных результатов по локальной обработке стали лазерным излучением                             |
| Критерии приемки результатов:   | Структура очагов лазерного воздействия после закалки, значение твердости и пластичности после лазерной обработки |
| Требование к результату проекта | Требования:                                                                                                      |
|                                 | Малое количество остаточного аустенита                                                                           |
|                                 | Высокое значение микротвердости                                                                                  |
|                                 | Отсутствие стадии “легкого скольжения” при растяжении                                                            |

## 2) Организационная структура проекта

На данном этапе работы были решены следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определены роли каждого участника проекта, а также прописаны функции, выполняемые каждым из участников и трудозатраты в проекте. Данные по организационной структуре описаны в таблице 13.

Таблица 13 – Рабочая группа проекта

| №<br>п/п | ФИО,<br>основное место<br>работы,<br>должность | Роль в<br>проекте       | Функции                        | Трудо-<br>затраты,<br>час. |
|----------|------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 1        | Зыков И.Ю.<br>НИ ТПУ, доцент                   | Руководитель<br>проекта | Руководить,<br>координировать  | 10                         |
| 2        | Мельников А.Г.<br>НИ ТПУ, доцент               | Эксперт<br>проекта      | Консультировать,<br>направлять | 15                         |
| 3        | Макогон И.С<br>НИ ТПУ, студент                 | Исполнитель<br>проекта  | Выполнение работ по<br>проекту | 40                         |
| 4        | Лобанкова О.<br>НИ ТПУ, ассистент              | Исполнитель<br>проекта  | Выполнение работ по<br>проекту | 45                         |
| ИТОГО:   |                                                |                         |                                | 110                        |

### 3) Ограничения и допущения проекта

Все имеющиеся данные по ограничениям и допущениям описаны и сведены в таблице 14

Таблица 14 – Ограничения проекта

| Фактор                                              | Ограничения/ допущения                                        |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 3.1 Сроки проекта:                                  |                                                               |
| 3.1.1 Дата утверждения плана<br>управления проектом | 15.01.2016                                                    |
| 3.1.2 Дата завершения проекта                       | 20.04.2016                                                    |
| 3.2 Прочие ограничения и допущения                  | Ограничения по времени использования<br>научного оборудования |

### 6.3 Планирование управления научно-техническим проектом

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

План управления научным проектом должен включать в себя следующие элементы:

#### 6.3.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. Представлена на рисунке 5.1



Рисунок 5.1 – Иерархическая структура работ по проекту

#### 6.3.2 Контрольные события проекта

В рамках данного раздела определялись ключевые события проекта, их даты и полученные результаты, по состоянию на эти даты. Эта информация сведена в таблицу 15.

Таблица 15 – Контрольные события проекта

| № п/п | Контрольное событие        | Дата       | Результат (подтверждающий документ)             |
|-------|----------------------------|------------|-------------------------------------------------|
| 1     | Обработка литературы       | 1.02.2016  | Постановление задач на исследование             |
| 2     | Подготовка образцов        | 10.02.2016 | Начало первой фазы эксперимента                 |
| 3     | Обработка образцов лазером | 15.02.2016 | Начало второй фазы эксперимента                 |
| 4     | Исследование на растяжение | 20.02.2016 | Получен достаточный объем данных в исследовании |
| 5     | Обработка данных           | 16.03.2016 | Составлен отчет о результатах исследования      |

### 6.3.3 План проекта

В рамках планирования научного проекта был построен календарный и сетевой графики проекта. Линейный график представлен в таблице 16.

Таблица 16 – Календарный план проекта

| Код работы (из ИСР) | Название                   | Длительность, дни | Дата начала работ | Дата окончания работ | Состав участников (ФИО ответственных исполнителей) |
|---------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------------------------------------|
| 1                   | Исследование литературы    | 16                | 15.01.2016        | 1.02.2016            | Макогон И.С.                                       |
| 2                   | Подготовка образцов        |                   |                   |                      | Зыков И.Ю.                                         |
| 2.1                 | Вырезание из металла       | 3                 | 1.02.2016         | 3.02.2016            |                                                    |
| 2.2                 | Термическая обработка      | 2                 | 4.02.2016         | 5.02.2016            |                                                    |
| 3                   | Проведение эксперимента    |                   |                   |                      |                                                    |
| 3.1                 | Создание очагов упрочнения | 2                 | 14.02.2016        | 15.02.2016           | Макогон И.С.<br>Лобанкова О.В.                     |
| 3.2                 | Шлифовка образцов          | 1                 | 19.02.2016        | 19.02.2016           | Мельников А.Г.<br>Лобанкова О.В.                   |
| 3.3                 | Растяжение образцов        | 1                 | 20.02.2016        | 20.02.2016           | Зыков И.Ю.<br>Макогон И.С.                         |
| 4                   | Анализ полученных          |                   |                   |                      |                                                    |

|        | данных                          |    |            |            |                                  |
|--------|---------------------------------|----|------------|------------|----------------------------------|
| 4.1    | Исследование структуры стали    | 6  | 21.02.2016 | 26.02.2016 | Мельников А.Г.<br>Макогон И.С.   |
| 4.2    | Измерение микротвердости        | 1  | 26.02.2016 | 26.02.2016 | Мельников А.Г.<br>Лобанкова О.В. |
| 4.3    | Построение диаграмм зависимости | 2  | 28.02.2016 | 29.02.2016 | Лобанкова О.В.                   |
| 4.4    | Отчет по работе                 | 16 | 1.03.16    | 16.03.2016 | Макогон И.С.                     |
| Итого: |                                 | 50 | 15.01.2016 | 16.03.2016 |                                  |

Таблица 17 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

| Код работы<br>(из ИСР) | Вид работ                       | Исполнители             | Т <sub>к</sub> ,<br>кал,<br>дн. | Продолжительность выполнения работ |   |   |         |   |   |      |   |   |
|------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---|---|---------|---|---|------|---|---|
|                        |                                 |                         |                                 | январь                             |   |   | февраль |   |   | март |   |   |
|                        |                                 |                         |                                 | 1                                  | 2 | 3 | 1       | 2 | 3 | 1    | 2 | 3 |
| 1                      | Исследование литературы         | дипломник               | 16                              |                                    |   |   |         |   |   |      |   |   |
| 2.1                    | Вырезание из металла            | Руководитель            | 3                               |                                    |   |   |         |   |   |      |   |   |
| 2.2                    | Термическая обработка           | Руководитель            | 2                               |                                    |   |   |         |   |   |      |   |   |
| 3.1                    | Создание очагов упрочнения      | Дипломник, Исполнитель  | 2                               |                                    |   |   |         |   |   |      |   |   |
| 3.2                    | Шлифовка образцов               | Консультант, инженер    | 1                               |                                    |   |   |         |   |   |      |   |   |
| 3.3                    | Растяжение образцов             | Руководитель, дипломник | 1                               |                                    |   |   |         |   |   |      |   |   |
| 4.1                    | Исследование структуры стали    | Консультант, дипломник  | 6                               |                                    |   |   |         |   |   |      |   |   |
| 4.2                    | Измерение микротвердости        | Исполнитель             | 1                               |                                    |   |   |         |   |   |      |   |   |
| 4.3                    | Построение диаграмм зависимости | Исполнитель             | 2                               |                                    |   |   |         |   |   |      |   |   |
| 4.4                    | Отчет по работе                 | дипломник               | 16                              |                                    |   |   |         |   |   |      |   |   |



– руководитель



– дипломник



– инженер



– консультант

#### 6.3.4 Бюджет научного исследования

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

##### 1) Сырье, материалы, покупаемые изделия и полуфабрикаты

Результаты по данной статье записаны в таблице 18.

Таблица 18 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и полуфабрикаты

| Наименование                               | Марка, размер      | Кол-во | Цена за единицу, руб. | Сумма, руб. |
|--------------------------------------------|--------------------|--------|-----------------------|-------------|
| Сталь                                      | У12, 60х16х3<br>см | 3      | 100                   | 300         |
| Оформление документации                    | Лист А4            | 50     | 2                     | 100         |
| Всего за материалы                         |                    |        |                       | 400         |
| Транспортно-заготовительные расходы (3-5%) |                    |        |                       | 20          |
| Итого по статье $C_m$                      |                    |        |                       | 420         |

##### 2) Специальное оборудование для научных работ

Результаты по данной статье записаны в таблице 19.

Таблица 19 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

| № п/п | Наименование оборудования | Кол-во единиц оборудования | Цена единицы оборудования, тыс.руб. | Общая стоимость оборудования/Аморт отчисления, тыс.руб. |
|-------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1     | Лазер Blacklight          | 1                          | 1600                                | 114                                                     |
| 2     | Микротвердомер пмт-3      | 1                          | 39                                  | 39                                                      |

### 3) Основная заработная плата

Таблица 20 – Расчет основной заработной платы

| №<br>п/п | Наименование<br>этапов         | Исполнители<br>по категориям | Трудо-<br>емкость,<br>чел.-дн. | Заработная плата,<br>приходящаяся на<br>один чел.-дн.,<br>тыс.руб. | Всего заработная<br>плата по тарифу<br>(окладам), тыс.<br>руб. |
|----------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 1        | Исследование<br>литературы     | Исполнитель                  | 16                             | 667                                                                | 10672                                                          |
| 2        | Подготовка<br>образцов         | Руководитель                 | 5                              | 1410                                                               | 7050                                                           |
| 3        | Проведение<br>эксперимента     | Руководитель                 | 1                              | 1410                                                               | 1410                                                           |
|          |                                | Консультант                  | 1                              | 1410                                                               | 1410                                                           |
|          |                                | Исполнитель                  | 3                              | 879                                                                | 2637                                                           |
|          |                                | Исполнитель                  | 3                              | 667                                                                | 2001                                                           |
| 4        | Анализ<br>полученных<br>данных | Консультант                  | 7                              | 1410                                                               | 9870                                                           |
|          |                                | Исполнитель                  | 3                              | 879                                                                | 2637                                                           |
|          |                                | Исполнитель                  | 22                             | 667                                                                | 14674                                                          |
| Итого:   |                                | 52361                        |                                |                                                                    |                                                                |

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

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (6.1)$$

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

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (6.2)$$

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

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 16);

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot М}{F_{\text{д}}}, \quad (6.3)$$

где  $З_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$М$  – количество месяцев работы при отпуске в 48 раб. дней  $М=10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, рабочие дни. (таблица 21).

Таблица 21 - Баланс рабочего времени

| Показатели рабочего времени                  | Руководитель | Консультант | Исполнитель | Дипломник |
|----------------------------------------------|--------------|-------------|-------------|-----------|
| Календарное число дней                       | 365          | 365         | 365         | 365       |
| Количество нерабочих дней                    | 104          | 104         | 104         | 104       |
| - выходные дни                               | 14           | 14          | 14          | 14        |
| - праздничные дни                            |              |             |             |           |
| Потери рабочего времени                      | 24           | 24          | 24          | 24        |
| - отпуск                                     |              |             |             |           |
| - невыходы по болезни                        |              |             |             |           |
| Действительный годовой фонд рабочего времени | 223          | 223         | 223         | 223       |

Месячный должностной оклад работника:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{б}} \cdot (k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (6.4)$$

где  $З_{\text{б}}$  – базовый оклад, руб.;

$k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент, (определяется Положением об оплате труда);

$k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: определяется Положением об оплате труда);

$k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 22 - Расчёт основной заработной платы

| Исполнители  | $З_{б,}$<br>руб. | $k_p$ | $k_d$ | $k_{пр}$ | $З_{м,}$<br>руб | $З_{дн,}$<br>руб. | $T_{р,}$<br>раб.<br>дн. | $З_{осн,}$<br>руб. |
|--------------|------------------|-------|-------|----------|-----------------|-------------------|-------------------------|--------------------|
| Руководитель | 23264            | 1,3   | 0     | 0        | 30243           | 1410              | 6                       | 8460               |
| Консультант  | 23264            | 1,3   | 0     | 0        | 30243           | 1410              | 8                       | 11280              |
| Исполнитель  | 14500            | 1,3   | 0     | 0        | 18850           | 879               | 6                       | 5274               |
| Исполнитель  | 11000            | 1,3   | 0     | 0        | 14300           | 667               | 41                      | 27347              |

## 4) Дополнительная заработная плата

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

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

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн} \quad (6.5)$$

где  $З_{доп}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{доп}$  – коэффициент дополнительной зарплаты;

$З_{осн}$  – основная заработная плата, руб.

В таблице 23 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 23 – Заработная плата исполнителей

| Заработная плата         | Руководитель | Консультант | Исполнитель | Исполнитель |
|--------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| Основная зарплата        | 8460         | 11280       | 5274        | 27347       |
| Дополнительная зарплата  | 1015         | 1354        | 633         | 3282        |
| Зарплата исполнителя     | 9475         | 12634       | 5907        | 30629       |
| Итого по статье $C_{зп}$ | 58645        |             |             |             |

## 5) Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0,271 \cdot 58645 = 15893, \quad (6.6)$$

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

#### б) Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70 - 90 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0,8 \cdot 58645 = 46916, \quad (6.7)$$

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости исследования очагов воздействия лазерного излучения на поверхности углеродистой стали. Все данные по статьям сведены в таблицу 24.

Таблица 24 – Группировка затрат по статьям

| Наименование статьи затрат                         | Размер затрат, р. |
|----------------------------------------------------|-------------------|
| Прямые материальные затраты (сырье, комплектующие) | 420               |
| Спецоборудование для научных работ                 | 39000             |
| Основная заработная плата                          | 52361             |
| Дополнительная заработная плата                    | 6284              |
| Отчисления на социальные нужды                     | 15893             |
| Амортизационные отчисления                         | 114000            |
| Прочие накладные расходы                           | 46916             |
| Итого плановая себестоимость                       | 274874            |

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

|                                           |                                                    |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Институт                                  | <b>ИФВТ</b>                                        |
| Направление подготовки<br>(специальность) | <b>Оптотехника</b>                                 |
| Уровень образования                       | Магистратура                                       |
| Кафедра                                   | <b>ЛИСТ</b>                                        |
| Период выполнения                         | осенний / весенний семестр 2015/2016 учебного года |

Студенту:

|               |                           |
|---------------|---------------------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                |
| 4ВМ4Б         | Макогону Ивану Сергеевичу |

Тема работы:

|                                                                                         |               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| «Исследование очагов воздействия лазерного излучения на поверхности углеродистой стали» |               |
| Утверждена приказом проректора-директора                                                | Яковлев А. Н. |

Форма представления работы:

|                                 |
|---------------------------------|
| <b>Магистерская диссертация</b> |
|---------------------------------|

### ЗАДАНИЕ

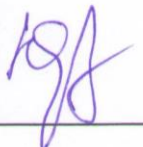
| <b>Исходные данные к разделу<br/>«Социальная ответственность»:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)</li> <li>– негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)</li> <li>– чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</li> </ul> | <p>Рабочим местом является отдельное помещение (научная лаборатория). Так как данное помещение находится внутри здания, на проектировщика возможны действия следующих факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Вредные факторы (монотонный режим работы, отклонение показателей микроклимата, недостаточная освещенность, превышение уровней шума)</li> <li>- Опасные факторы (лазерное излучение, электрический ток, пожар)</li> </ul> |
| 2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <p>1. Техника пожарной безопасности на производстве (ГОСТ 12.1.004–91 ССБТ)</p> <p>2. Техника безопасности при работе с электро – и радиотехническими устройствами (ГОСТ 12.1.006–84).</p> <p>3. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. ГОСТ 12.1.005–88 (с изм. №1 от</p>                                                                                                                                                  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <p>2000 г.). ССБТ.</p> <p>4. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. ГОСТ 12.1.019 -79 (с изм. №1) ССБТ</p>                                                                                                                                                                                |
| <b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</li> </ul> | <p>Условия труда в лаборатории характеризуются возможностью воздействия на исследователя следующих вредных факторов: шум, тепловыделения, недостаточная освещенность</p>                                                                                                                                              |
| <p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>                            | <p>При работе с лазером, который соединен с сетью напряжения, возможны электрические замыкания (удары) для персонала и пожары. Согласно нормам установлены средства пожаротушения.</p>                                                                                                                                |
| <p>3. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу(выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу(сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу(отходы);</li> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>                                                                                                                      | <p>Воздействие на окружающую среду сводится к минимуму, за счет отсутствия загрязняющих веществ, за исключением большого расходования электроэнергии, на которое мы подействовать не можем.</p>                                                                                                                       |
| <p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС на объекте;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>                                                                                                                                       | <p>Возможные ЧС для Сибири:</p> <p>1) природные – мороз;</p> <p>2) техногенные - диверсия;</p> <p>разработка превентивные меры по предупреждению ЧС;</p> <p>разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;</p> <p>разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий</p> |
| <p>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                               | <p>Соблюдение законов (налоговое законодательство, трудовой и гражданский кодексы). Руководитель (ответственный) принимает обязательства выполнения и организации правил эвакуации и соблюдения требования безопасности в помещении, а также контроль за исправностью работы в помещении</p>                          |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.                                                                                                                                                                                                                                                   | разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;<br><br>разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий                                                                                                                                 |
| <p>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul> | Соблюдение законов (налоговое законодательство, трудовой и гражданский кодексы). Руководитель (ответственный) принимает обязательства выполнения и организации правил эвакуации и соблюдение требования безопасности в помещении, а также контроль за исправностью работы в помещении |
| <b>Перечень графического материала:</b>                                                                                                                                                                                                                                                            | Пути эвакуации, Освещенность на рабочем месте                                                                                                                                                                                                                                         |

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b> | 10.02.16г |
|-------------------------------------------------------------|-----------|

**Задание выдал консультант:**

| Должность                                                    | ФИО                        | Ученая степень, звание  | Подпись                                                                              | Дата      |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности, Профессор | Федорчук Юрий Митрофанович | доктор технических наук |  | 10.02.16г |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                    | Подпись                                                                               | Дата     |
|--------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 4ВМ4Б  | Макогон Иван Сергеевич |  | 10.02.16 |

## 7 Социальная ответственность

### 7.1 Анализ выявленных факторов проектируемой производственной среды

Лазерное излучение представляет особую опасность для тканей, максимально поглощающих излучение. Сравнительно легкая уязвимость роговицы и хрусталика глаза, а также способность оптической системы глаза многократно увеличивать плотность энергии(мощность) излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазона ( $780 < \lambda < 1400$  нм) на глазном дне по отношению к роговице делают глаз наиболее уязвимым органом. При повреждении появляется боль в глазах, спазм век, слезотечение, отек век и глазного яблока, помутнение сетчатки, кровоизлияние. Клетки сетчатки после повреждения не восстанавливаются.

Исходя из данных таблицы 25, установленный в лаборатории лазер относится к III классу.

Таблица 25 – Классификация классов опасности лазера

| Класс лазера | Выходные излучения лазера                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I            | Не представляет опасности для глаз и кожи                                                                                                                                                                                                              |
| II           | Представляет опасность при облучении глаз прямым или зеркальным отражением излучения                                                                                                                                                                   |
| III          | Представляет опасность при облучении глаз прямым, зеркальным отражением излучения, а также диффузно отраженным излучением на расстоянии 10 см от диффузно отражающей поверхности и (или) при облучении кожи прямым или зеркальным отражением излучения |
| IV           | Представляет опасность при облучении кожи диффузно отраженным излучением на расстоянии 10 см от диффузно отражающей поверхности                                                                                                                        |

Предупреждение поражений лазерным излучением включает систему мер инженерно-технического, планировочного, организационного, санитарно-гигиенического характера.

При использовании лазеров II-III классов в целях исключения облучения персонала необходимо либо ограждение лазерной зоны, либо экранирование пучка излучения. Экраны и ограждения должны изготавливаться из материалов с наименьшим коэффициентом отражения, быть огнестойкими и не выделять токсических веществ при воздействии на них лазерного излучения.

При размещении в одном помещении нескольких лазеров следует исключить возможность взаимного облучения операторов, работающих на различных установках. Не допускаются в помещения, где размещены лазеры, лица, не имеющие отношения к их эксплуатации. Запрещается визуальная юстировка лазеров без средств защиты.

Для удаления возможных токсических газов, паров и пыли оборудуется приточно-вытяжная вентиляция с механическим побуждением. Для защиты от шума принимаются соответствующие меры звукоизоляции установок, звукопоглощения и др.

К индивидуальным средствам защиты, обеспечивающим безопасные условия труда при работе с лазерами, относятся специальные очки, щитки, маски, обеспечивающие снижение облучения глаз до ПДУ.

Средства индивидуальной защиты применяются только в том случае, когда коллективные средства защиты не позволяют обеспечить требования санитарных правил.

В лаборатории, где находятся различные лазерные установки, могут быть следующие вредные факторы: наличие - а) не комфортных метеоусловий; б) недостаточной освещенности; в) производственного шума; г) поражение электрическим током;

### 7.1.1 Метеоусловия

Микроклимат в производственных условиях определяется следующими параметрами: 1) температура воздуха; 2) относительная влажность воздуха; 3) скорость движения воздуха.

При высокой температуре воздуха в помещении кровеносные сосуды кожи расширяются, происходит повышенный приток крови к поверхности тела, и выделение тепла в окружающую среду значительно увеличивается. При низкой температуре окружающего воздуха реакция человеческого организма иная: кровеносные сосуды кожи сужаются, приток крови к поверхности тела замедляется, и теплоотдача конвекцией и излучением уменьшается. Таким образом, для теплового самочувствия человека важно определенное сочетание температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне.

Повышенная влажность воздуха ( $\phi > 85\%$ ) затрудняет терморегуляцию организма, т.к. происходит снижения испарения пота, а пониженная влажность ( $\phi < 20\%$ ) вызывает пересыхание слизистых оболочек дыхательных путей.

Оптимальные и допустимые показатели температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 26 [ГОСТ 12.1.005-88].

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.

Работы делятся на три категории тяжести на основе общих энергозатрат организма. Работа, относящаяся к инженерам – разработчикам, относится к категории легких работ. Допустимые значения микроклимата для этого случая даны в таблице.

Таблица 26 – Требования к микроклимату

| Период года | Категория работы | Температура, °С | Относительная влажность, % | Скорость движения воздуха, м/с |
|-------------|------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------------|
| Холодный    | средняя          | 19 – 24         | 15 - 75                    | $\leq 0.1$                     |
| Теплый      | средняя          | 20 - 28         | 15 - 75                    | $\leq 0.2$                     |

Одними из основных мероприятий по оптимизации микроклимата и состава воздуха в производственных помещениях являются обеспечение надлежащего воздухообмена и отопления, тепловая изоляция нагретых поверхностей оборудования, воздухопроводов и гидротрубопроводов.

#### 7.1.2 Производственный шум

Вентиляция производственных помещений предназначена для уменьшения запыленности, задымленности и очистки воздуха от вредных выделений производства, а также для сохранности оборудования. Она служит одним из главных средств оздоровления условий труда, повышения производительности и предотвращения опасности профессиональных заболеваний. Система вентиляции обеспечивает снижение содержания в воздухе помещения пыли, газов до концентрации не превышающей ПДК. Проветривание помещений проводят, открывая форточки. Проветривание помещений в холодный период года допускается не более однократного в час, при этом нужно следить, чтобы не было снижения температуры внутри помещения ниже допустимой. Воздухообмен в помещении можно значительно сократить, если улавливать вредные вещества в местах их выделения, не допуская их распространения по помещению. Для этого используют приточно-вытяжную вентиляцию. Кратность воздухообмена не ниже 3.

Предельно допустимый уровень (ПДУ) шума - это уровень фактора, который при ежедневной (кроме выходных дней) работе, но не более 40 часов в неделю в течение всего рабочего стажа, не должен вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и

последующих поколений. Соблюдение ПДУ шума не исключает нарушения здоровья у сверхчувствительных лиц.

Допустимый уровень шума ограничен ГОСТ 12.1.003-83 и СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002. Максимальный уровень звука постоянного шума на рабочих местах не должно превышать 80 дБА. В нашем случае этот параметр соответствовал значению 75 дБА.

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть СКЗ и СИЗ.

СКЗ:

- устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
- изоляция источников шума от окружающей среды средствами звуко- и виброизоляции, звуко- и вибропоглощения;
- применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения;

СИЗ:

- применение спецодежды, спецобуви и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

### 7.1.3 Освещенность

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда.

Помещение имеет следующие размеры: длина  $A=6$  м, ширина  $B=6$  м, высота  $H=3$  м. В лаборатории производятся работы средней точности, (минимальная величина различия составляет 0,5 - 1мм). Согласно СНиП 23-05-95 необходимо создать освещенность не ниже 150 лк, в соответствии с разрядом зрительной работы.

Площадь помещения:

$$S = A \times B, \quad (7.1)$$

где  $A$  – длина, м;  $B$  – ширина, м.

$$S = 8 \times 6 = 48 \text{ м}^2$$

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор  $\rho_c=50\%$ , свежепобеленного потолка  $\rho_{II}=70\%$ . Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен  $K_z=1,5$ . Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп  $Z=1,1$ .

Выбираем лампу дневного света ЛД-40, световой поток которой равен  $\Phi_{ЛД} = 2600$  Лм.

Выбираем светильники с люминесцентными лампами типа ОДОР-2-40. Этот светильник имеет две лампы мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна 1227 мм, ширина – 265 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda$ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем  $\lambda=1,1$ , расстояние светильников от перекрытия (свес)  $h_c = 0,3$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p, \quad (7.2)$$

где  $h_n$  – высота светильника над полом, высота подвеса,

$h_p$  – высота рабочей поверхности над полом.

Наименьшая допустимая высота подвеса над полом для двухламповых светильников ОДОР:  $h_n = 3,5$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 3,5 - 1 - 0,5 = 2,0 \text{ м}.$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2 = 2,2 \text{ м}, \quad (7.3)$$

Число рядов светильников в помещении:

$$Nb = \frac{B}{L} = \frac{6}{2,2} = 2,72 \approx 3, \quad (7.4)$$

Число светильников в ряду:

$$Na = \frac{A}{L} = \frac{8}{2,2} = 3,64 \approx 4, \quad (7.5)$$

Общее число светильников:

$$N = Na \cdot Nb = 4 \cdot 3 = 12, \quad (7.6)$$

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены определяется по формуле:

$$l = \frac{L}{3} = \frac{2,2}{3} = 0,7 \text{ м}, \quad (7.7)$$

Размещаем светильники в два ряда. На рисунке 7.1 изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

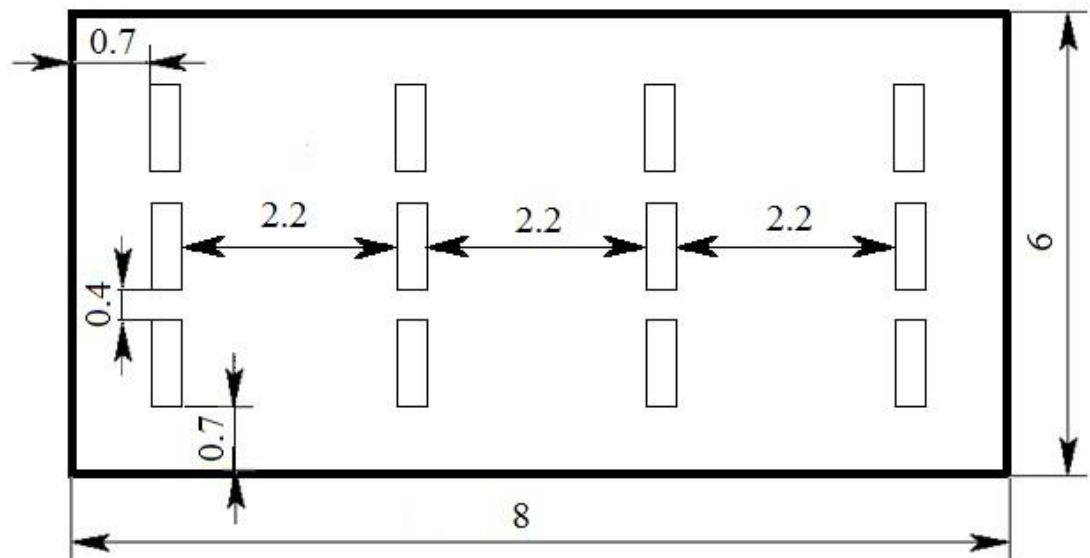


Рисунок 7.1 – План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{8 \cdot 6}{2,0 \cdot (8 + 6)} = 1,7, \quad (7.8)$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа ОДОР с люминесцентными лампами при  $\rho_{\Pi} = 70 \%$ ,  $\rho_{\text{с}} = 50\%$  и индексе помещения  $i = 1,7$  равен  $\eta = 0,47$ .

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 8 \cdot 6 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,47} = 2106,38 \text{ лм}, \quad (7.9)$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% \leq 20\%, \quad (7.10)$$

$$\frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% = \frac{2600 - 2106,38}{2600} \cdot 100\% = 19\%.$$

Таким образом:  $-10\% \leq 19\% \leq 20\%$ , необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

## 7.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды

### 7.2.1 Факторы электрической природы

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статистического электричества.

Электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещения без повышенной опасности), до 1000 В с присутствием агрессивной среды (помещения с повышенной опасностью) и свыше 1000 В (помещения особо опасные).

В отношении опасности поражения людей электрическим током различают:

1. Помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность.

2. Помещения с повышенной опасностью, которые характеризуются наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность: сырость, токопроводящая пыль, токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.), высокая температура, возможность одновременного прикосновения человека к

имеющим соединение с землей металлоконструкциям, технологическим аппаратам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой.

3. Особо опасные помещения, которые характеризуются наличием оборудования свыше 1000 В и одного из следующих условий, создающих особую опасность: особой сырости, химически активной или органической среды, одновременно двух или более условий повышенной опасности. Территории размещения наружных электроустановок в отношении опасности поражения людей электрическим током приравниваются к особо опасным помещениям.

Лаборатория относится к помещениям без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность, так как номинальное напряжение лазерной установки соответствует 220 В. Все токоведущие части установки изолированы и находятся в защитном кожухе.

Дополнительные электрозащитные средства в электроустановках. К дополнительным изолирующим электрозащитным средствам относятся диэлектрические перчатки, боты, резиновые коврики и дорожки, изолирующие подставки на фарфоровых изоляторах и переносные заземления. Освобождение пострадавшего от действия тока может быть произведено несколькими способами в установках до 1000 В. Отключение электроустановки производится с помощью ближайшего рубильника, выключателя или иного отключающего аппарата, а также путем снятия или вывертывания предохранителей (пробок), разъема штепсельного соединения. Если почему-либо быстро отключить электроустановку вручную не представляется возможным из-за удаленности или недоступности выключателя, можно прервать цепь тока через пострадавшего, перерубив провода, воспользовавшись топором с сухой деревянной рукояткой или кусачками, пассатижами и другим инструментом с изолирующими рукоятками. Перерубать (перерезать) следует каждый провод в отдельности, чтобы не вызвать короткое замыкание между проводами, в результате которого может возникнуть электрическая дуга,

способная причинить оказывающему помощь серьезные ожоги тела и повреждение глаз.

#### 7.2.2 Факторы пожарной и взрывной природы

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1 - В4, Г и Д, а здания - на категории А, Б, В, Г и Д. По пожарной опасности наружные установки подразделяются на категории  $A_{н}$ ,  $B_{н}$ ,  $B_{н1}$ ,  $\Gamma_{н}$  и  $D_{н}$ .

Согласно НПБ 105-03 лаборатория относится к категории Г - негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и пламени;

По степени огнестойкости данное помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 2.01.02-85 (выполнено из кирпича, которое относится к трудносгораемым материалам). Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Причины возникновения пожара неэлектрического характера:

а) халатное неосторожное обращение с огнем (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 и локализации пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

- а) использование только исправного оборудования;
- б) проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- д) отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ;
- е) курение в строго отведенном месте;

ж) 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.

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. 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. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.

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



Рисунок 7.2. План эвакуации

В корпусе на этаже имеются 3 огнетушителя, все предназначены для тушения загорания различных веществ и материалов, электроустановок под напряжением до 1000 В. При возникновении пожара необходимо выдернуть чеку, направить раструб в сторону огня, нажать на рычаг запорного устройства и приступить к тушению пожара.

### 7.2.3 Охрана окружающей среды

Охрана окружающей среды - это комплексная проблема и наиболее активная форма её решения - это сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства.

Лазерная обработка представляет практически безотходную технологию, возможно только незначительное испарение материала при обработке.

Так же необходимо позаботиться о отдельных контейнерах для отходов бытового характера: отдельные мусорные баки для бумаги, стекла,

металлических частей, пластика. Необходимо заключить договор с компанией, вывозящей мусор, чтобы она обеспечивала доставку разделенных отходов фирмам, занимающимся переработкой отходов.

#### 7.2.4 Защита в ЧС

Производство находится в городе Томске с континентально-циклоническим климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д.), в данном городе отсутствуют.

Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы и диверсия.

Для Сибири в зимнее время года характерны морозы. Достижение критически низких температур приведет к авариям систем теплоснабжения и жизнеобеспечения, приостановке работы, обморожениям и даже жертвам среди населения. В случае разморозки труб должны быть предусмотрены запасные обогреватели. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась. Перед наступлением отопительного сезона должна проводиться «подготовка к зиме», проверка всех систем теплообеспечения в лаборатории, проверка работоспособности резервных электрообогревателей. Так же должны быть предусмотрены аварийные дизель-генераторы для обеспечения аварийного бесперебойного электроснабжения.

Чрезвычайные ситуации, возникающие в результате диверсий, возникают все чаще.

Зачастую такие угрозы оказываются ложными. Но случаются взрывы и в действительности.

Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи, а также исключения распространения информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, системах охраны, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица раз в полгода проводят тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.

В случае ЧС необходимо предоставить транспорт для эвакуации персонала.

#### 7.2.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

1. ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны
2. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
3. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
4. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
5. ГОСТ 12.4.123-83. Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений. Общие технические требования.
6. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
7. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
8. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.
9. ГОСТ 12.2.037-78. Техника пожарная. Требования безопасности
12. СанПиН 2.1.6.1032-01. Гигиенические требования к качеству атмосферного воздуха
13. ГОСТ 30775-2001 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов.
14. СНиП 21-01-97. Противопожарные нормы.
15. ГОСТ 12.4.154. Система стандартов безопасности труда. Устройства экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты. Общие технические требования, основные параметры и размеры
16. СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение"

## Заключение

В диссертации было проведено исследование очагов воздействия лазерного излучения на поверхности углеродистой стали. По полученным данным сделано заключение о том, что создание системы очагов упрочнения в углеродистых сталях позволяет повлиять на локализацию пластического течения и на стадийность кривой нагружения.

Дальнейшие исследования в данной области позволят сформулировать критерии оптимального диаметра, глубины и твердости очагов упрочнения, которые будут обеспечивать высокие характеристики по износостойкости, прочности, а так же надежности и ресурса работы материала.

### Список публикаций

1. Lobankova O. V. , Melnikov A. G. , Zykov I. Y. , Makogon I. S. Structure and properties of subjected to rapid quenching surface tool steels // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems: Proceedings of International Conference, Tomsk, December 1-4, 2015. - Tomsk: TPU Publishing House, 2015 - p. 1-4

## Список используемых источников

1. Гуляев, А.П., Гуляев, А.А. Металловедение: Учебник для вузов. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ИД Альянс, 2011. – 644 с.
2. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справ. / под ред. Н. Н. Рыкалина. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
3. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 665 с.
4. Dahotre Narendra B. Laser Surface Hardening. – University of North Texas, 2013. – P. 26.
5. Qiu Feng. Surface transformation hardening of carbon steel with high power fiber laser / Thesis for the degree of Doctor of Science. – Lappeenranta, 2013. – P. 118.
6. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество: уч. пособие / Е. В. Харанжевский, М. Д. Кривилёв. – Ижевск, 2011. – 187 с.
7. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 300 с.
8. Зуев Л.Б., Данилов В.И. Автоволновая модель деформации и разрушения// VI Российская научно-техническая конференция "Механика микронеоднородных материалов и разрушение"\24.05.2010 – 28.05.2010, г. Екатеринбург. – URL : <http://do.gendocs.ru/download/docs-147955/147955.doc>.
9. Зуев Л. Б. Макроскопическая физика пластической деформации металлов //Успехи физики металлов. – 2015.
10. Newnham R. E. Properties of Materials: Anisotropy, Symmetry, Structure: Anisotropy, Symmetry, Structure. – OUP Oxford, 2004.
11. Зуев Л. Б. Автоволновая модель пластического течения //Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14. – №. 3.

12. Данилов В. И. Типы локализации пластической деформации и стадии диаграмм нагружения металлических материалов с различной кристаллической структурой /В.И. Данилов, Л.Б. Зуев, Е.В. Летахова, Д.В. Орлова, И.А. Охрименко //Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47. – №. 2. – С. 176-184.

13. Панин В. Е. Физические принципы мезомеханики поверхностных слоев и внутренних границ раздела в деформируемом твердом теле / В. Е. Панин, В. М. Фомин, В. М. Титов //Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6. – №. 2.

14. Лазерный центр [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. СПб. URL:<http://www.newlaser.ru>, свободный. – Яз. русский. Дата обращения: 10.05.2016 г.

15. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Мних Н.М./ Заводская лаборатория. 1990. Т.56. №2. С. 90 – 93.

Раздел 2

*LASER RADIATION INTERACTION WITH METALS*

Студент:

| Группа | ФИО                    | Подпись             | Дата      |
|--------|------------------------|---------------------|-----------|
| 4BM4Б  | Макогон Иван Сергеевич | <i>И.С. Макогон</i> | 7.06.2016 |

Консультант-лингвист кафедры ИЯФТ:

| Должность             | ФИО                         | Ученая степень,<br>звание | Подпись            | Дата       |
|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------|------------|
| Старший преподаватель | Ботова Анастасия Леонидовна |                           | <i>А.Л. Ботова</i> | 09.06.2016 |

## 2. Laser radiation interaction with metals

To describe the effect of laser radiation on metals, semiconductors and insulators is customary to distinguish several stages: heating without a phase transition; melting and evaporation; ionization of the vaporized material and plasma formation.

### 2.1 Lasers for laser material processing and plasma generation

In the last three decades in the field of heat treatment are well known three different types of laser sources: CO<sub>2</sub>, Nd: YAG and diode lasers of high power. By the end of the last century, the CO<sub>2</sub> laser was almost the only laser that has been able to provide a combination of power density and time of the interaction of radiation with matter necessary for the occurrence of hardening. Since the late 1990s, the development of Nd: YAG lasers with a power of several kilowatts pumped by flash lamp or diode pumped ensured the emergence of an alternative source of a number of advantages. One major advantage of Nd: YAG laser is that the laser wavelength (typically 1.06  $\mu\text{m}$ ) enables the laser beams to be delivered by an optical fiber with relatively low energy losses. This allows the path through which the radiation passes, to be bent towards the target. Consequently, Nd: YAG lasers provide high power levels of the laser can be applied as part of a manipulating robot, which makes them ideal for three-dimensional processing. Much later invented kilowatt diode lasers with a wavelength of about 0.8 microns; they are compact and can be mounted directly on the robot for the hardening of components with complex geometry. As compared with the length of the CO<sub>2</sub> laser wavelength (about 10.6 mm) wavelengths of light from Nd: YAG and diode lasers are absorbed much stronger on the metal surface.

As a result, Nd: YAG and diode lasers have been used in various treatments of steels and alloys thereof.

During the last decade in the field of high-power fiber lasers development much headway. From laboratory kits, delivering radiation with mW power output at the beginning of the 1990s, fiber lasers developed in the laser systems power up to

several kilowatts for use in industrial material processing. At the heart of the evolution of fiber lasers based on two technological developments: optical communication industry created the first technology to increase the bandwidth of single-mode fibers, optoelectronics industry made a high-power laser diodes needed for pumping fiber. High power fiber laser level largely depends on the availability of reliable and durable diode pump systems.

Table 1 – Compare strongly powerful laser systems

| Factor                        | CO <sub>2</sub> | Nd: YAG         | Diode           |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Wavelength, mkm               | 10,6            | 1,06            | 0,808           |
| Metal absorption, %           | 5-10            | 25-35           | 30-40           |
| Efficiency, %                 | 10              | 10              | 30              |
| Average power consumption, kW | 50              | 30              | 10              |
| laser power, kW               | 5               | 8               | 3               |
| Maximum power density         | 10 <sup>8</sup> | 10 <sup>9</sup> | 10 <sup>6</sup> |

For localized hardening currently use Nd: YAG and diode lasers, because they combine a high efficiency and a better absorption of metals due to work in a short-wavelength range, and these lasers have low maintenance costs (Table 1).

Figure 1 shows the absorption of laser radiation at different wavelengths for different metals. Since different types of steels absorb CO<sub>2</sub> laser radiation with rather low efficiency (about 5.2 percent), it becomes necessary to apply surface treatment prior to treatment to increase the absorption of laser radiation. While the Nd: YAG, diode, fiber and diode-pumped lasers are absorbed steels can be about 35 percent or even higher, and thus, a coating or other surface pretreatment is not necessary.

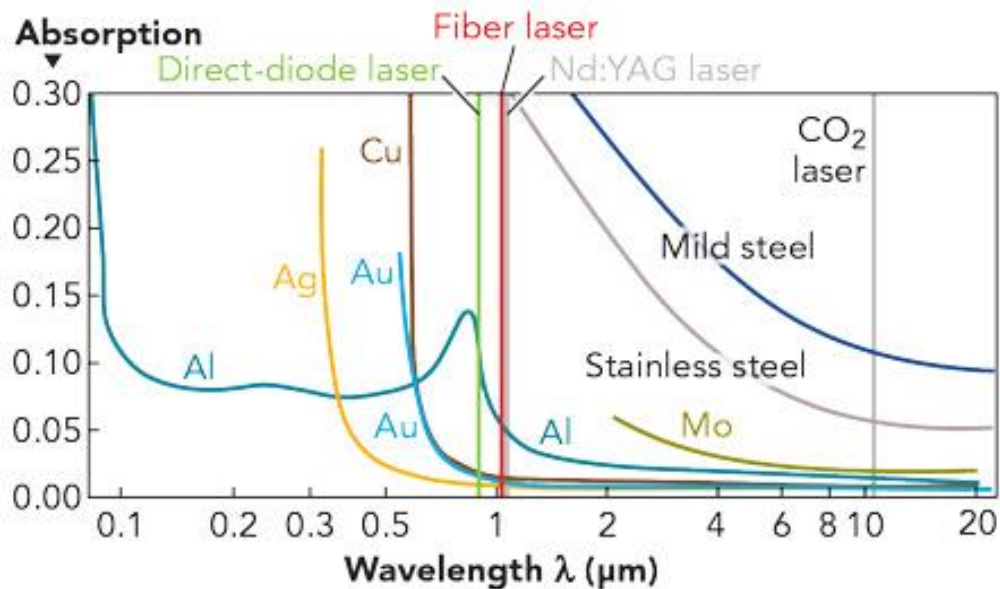


Figure 1 - Absorption of various metals at relevant wavelengths for industrial lasers, showing direct-diode lasers operating at 970nm corresponding to a higher absorption than fiber lasers

Other benefits, such as fiber delivery system, higher wall plug efficiency, and lower maintenance costs, have also increased the adoption of the technology, but are most often seen as additional benefits to the enhanced cutting speed. Recent innovations in direct-diode laser systems now enable direct cutting of metals with diodes, eliminating the complexity and cost associated with fiber and disk lasers, which both require additional components and a secondary gain medium to produce a good-enough-quality beam for material processing . As a result of this, a comparison of direct-diode and fiber laser cutting systems became possible for the first time, and has been the topic of several presentations at workshops and conferences in 2015. The results of this comparison show that improvement in cutting speed is achieved, most clearly in materials such as aluminum, as a result of the stronger absorption at the diode wavelength around 970nm (figure 2). Improvement in cutting speeds can approach 100%, in the case of a 1kW direct-diode laser delivered into 50 $\mu\text{m}$  fiber (BBP  $\sim$ 2.5mm-mrad), when compared with a comparable fiber laser operating at 1.08 $\mu\text{m}$ .

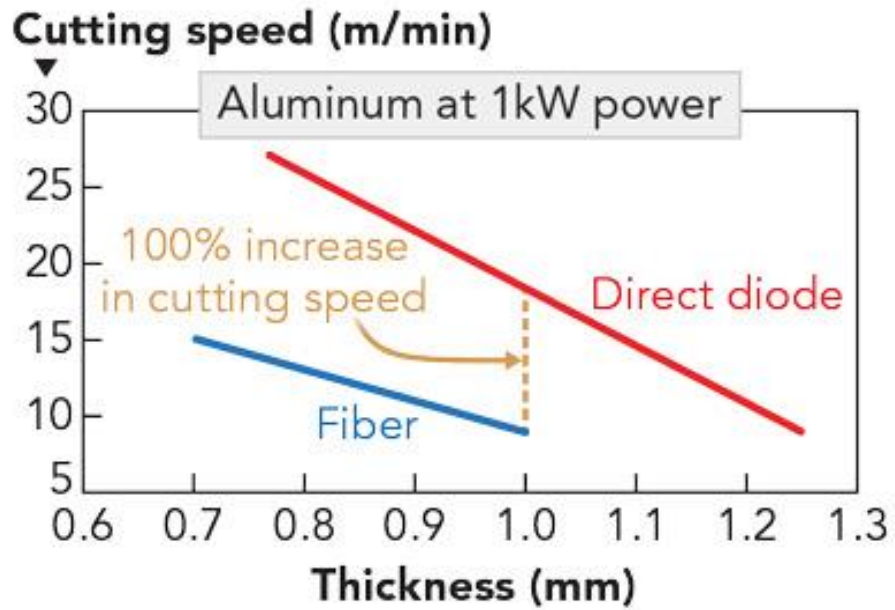


Figure 2 - Comparison of 1kW direct-diode laser (970nm) and fiber laser (1060nm) cutting systems with similar BPP (2.5mm-mrad) and spot size at the workpiece.

## 2.2 Optical properties of metals

In the infrared and visible range of the optical metals very reflects incident light on them. As a result of the interaction of light with free electrons in metals, whose concentration reaches  $10^{22} - 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ , there is intense light scattering. Secondary waves, forming a strong reflected wave generated oscillations of electrons. The absorption of light quanta by conduction electrons is likely only if their simultaneous collisions with phonons, impurities, with each other, the metal surface, and grain boundaries of the crystallites. The thin surface layer, which fades into the metal penetrating radiation of the scattered light is a collision and the creation of the reflected wave.

The propagation of electromagnetic waves in a homogeneous isotropic medium having conductivity investigated by Maxwell's equations. It should be borne in mind that in a homogeneous conductor the electric field is absent. For electrically neutral environments ( $\text{div} \vec{E} = 0$ ), Maxwell's equations can be transformed into

$$\begin{aligned}\nabla^2 \vec{E} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= 0, \\ \nabla^2 \vec{H} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} &= 0.\end{aligned}$$

Solving these equations for a plane electromagnetic wave propagating in the positive direction of the x-axis, can be written as

$$\begin{aligned}E &= E_0 \exp(-k_i x) \exp(i(kx - \omega t)), \\ H &= H_0 \exp(-k_i x) \exp(i(kx - \omega t)).\end{aligned}$$

Then take into account that the wave number should be replaced with a complex wave number for the conducting medium:

$$k^2(\omega) = \omega^2 \varepsilon \mu - i\omega \sigma \mu = (k - ik_i).$$

From the solutions of the equations for a plane electromagnetic wave, it follows that as the penetration depth of the amplitude of the vectors of the conductor decrease exponentially. Consequently, a substantial part of the electric field is concentrated near the surface of a conductor, whose thickness is small (for example, copper penetration depth is not more than 2 nm). For this reason, to talk about the propagation of light in a conductor is inappropriate.

Reflectance  $R$  of electromagnetic waves and the substance surface transmittance  $T$  can be defined as the ratio of flux density of the reflected and transmitted waves. When taking into account the energy absorption in the surface layer can obtain the equation

$$T + R + A = 1,$$

where  $A$  - absorbance substance.

Each of the known relations optics dielectrics may formally move into the optics of metals or other absorbing media replacement elementary real values of the refractive index  $n$  and the wave vector  $k$  in the complex analogues  $\tilde{n}$  and  $k$ , respectively.

Reflection and absorption of electromagnetic waves are caused by processes occurring inside the metal, rather than at the interface. The proportion of the incident

monochromatic radiation, for opaque solids, which was absorbed by the body, is due to its ability to absorb, whereas in the case of normal incidence

$$A = 1 - R = \frac{4n}{(n + 1)^2 + k_p^2}.$$

Thus,  $A$  may be calculated from the measured data or the optical constants of the complex refractive index.

Because the radiation is absorbed by a thin surface layer of material to describe the interaction of laser radiation to metals can be used so-called "thermal model". According to this model may be analyzed independently, impacts four stages: the transition of the absorbed energy into heat and light absorption; heating the material without breaking; destruction and dispersion of degradation products; cooling. Thermal model made it possible successfully to describe the propagation of heat, melting, modification of the structure of matter.

### 2.3 Melting and evaporation of metal

Turning now to the stage of melting and evaporation of metals. Share these processes cannot be, because the saturated vapor pressure is growing rapidly with a small increase in temperature above the melting point. Analyzing the interrelated process of melting - evaporating metals in accordance with the model of successive stages, we will not consider the process of plasma formation.

Stage heating without changing the phase state stands out clearly, particularly at temperatures much below the melting point of time, but the melting step to allocate substantially more difficult. This is due to the fact that in the space where the temperature varies from the melting point to boiling greatly increases rapidly the equilibrium vapor pressure. Refresh your memory, that the boiling point - the temperature at which the equilibrium vapor pressure equal to the pressure of the surrounding gas. Thus, provided that the melting process will be a threshold, which is necessary for the temperature exceeds the melting temperature, the evaporation process is not the threshold, the equilibrium vapor pressure increases smoothly and quickly with increasing temperature. Therefore, if necessary to designate the melting

stage can be ignored and evaporation, the metal must be heated to temperatures which are within a rather restricted range of melting temperature.

In order to quantify the need for the implementation of metal melting process parameters of the laser, it is necessary to take into account a variety of data and relationships that characterize the melting process. The first thing to analyze changes in the thermal properties of metals in two phases: solid and liquid. Specific heat is almost unchanged, and the thermal conductivity is reduced by almost a factor of 2 when the metal is melted. Thus the order of evaluation can be done without considering these changes and use the data to the solid phase.

Second, be sure to take into account that it is the latent heat of melting metal. When melting occurs during laser induced heating, it is necessary to take into account the latent heat. In order to melt a material, not only the energy to reach the melt threshold has to be provided by the laser pulse but also the latent heat, denominated also melt enthalpy. The amount of heat necessary to preserve melting depends strongly on the material and is proportional to the volume to be melted. The relation between the energy required to reach the melting point  $\Delta H_{\rightarrow T_{sl}}$  and the melt enthalpy  $\Delta H_{sl}$  is very important in order to understand the material behavior during melting followed by rapid solidification. Whereas the relation melt enthalpy/ melting point for semiconductors is generally higher than 1, for metals it is much smaller than 1. As a consequence of the high metal enthalpy values, it is “more difficult” to melt a semiconductor lattice than a metal lattice. Taking into account that during solidification (the “inverse” process of melting) melt enthalpy is released, semiconductors are also expected to solidify slower than metals.

Table 2 - Thermodynamic data of selected semiconductors, semimetals and metals.  $\Delta H_{\rightarrow T_{sl}}$  is the heat required to reach the melting point  $T_{sl}$  starting from the room temperature,  $\Delta H_{sl}$  the latent heat for melting.

| Materials | $T_{sl}$ (K) | $\Delta H_{\rightarrow T_{sl}}$<br>(kJ/mole) | $\Delta H_{sl}$<br>(kJ/mole) | $\Delta H_{sl} / \Delta H_{\rightarrow T_{sl}}$ |
|-----------|--------------|----------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|
| Ge        | 1210         | 25.8                                         | 34.8                         | 1.35                                            |
| Si        | 1685         | 36.0                                         | 50.3                         | 1.39                                            |
| Sb        | 904          | 16.6                                         | 20.1                         | 1.20                                            |
| Ag        | 1234         | 23.3                                         | 12.0                         | 0.52                                            |
| Co        | 1768         | 54.0                                         | 15.9                         | 0.29                                            |
| Al        | 933          | 17.2                                         | 10.7                         | 0.62                                            |

This feature of high latent heat values in combination with a related phenomenon - the high reflectivity of some liquid semiconductors in the visible - can lead to a very peculiar phenomenon, known as “melting instability”. This effect occurs under irradiation by visible or infrared laser pulses with durations clearly longer than the time required to melt the material. In Si or Ge irradiated just above the melt threshold, it has been found that the power absorbed by the solid is sufficient to initially melt the surface, but the power absorbed by the initially formed liquid is insufficient to prevent resolidification. Hence, neither a homogeneous solid nor a homogeneous melt are stable and a mixture of solid and molten patches coexist at the surface. The ratio of molten to solid fraction is a function of pulse energy, while the feature size is determined by the optical absorption length in the solid.

And the third factor that must be taken note of, in common situations radiation metal laser melting in the air - it is the oxidation of the surface and due to oxidation, radiation reflection coefficient change.

Strictly to describe the melting process is not quite simple, because of the fact that one should take into account all the above factors, the dynamics given time

distribution of the laser radiation and advancing the boundary between solid and liquid phases into the metal while it is heated. Melting of metals by radiation of the laser has a high value to current practice and metal working technology. But at the same conditions in the practical implementation of the melting are always implemented simultaneously and strong vaporization substance.

From the above it follows that a small excess of metal at a temperature above the melting point, vaporization may negligible, and when it reaches the boiling point, then the vapor pressure corresponds to the pressure of the surrounding gas. A cloud of steam that appears before the heated surface in the path of the radiation qualitatively changes the interaction of laser radiation with metal. To begin with, the pair can effectively absorb radiation shielding surface which is heated by the source. Also, there is a possibility vapor ionization by radiation, so the plasma will have to absorb the radiation and screening, instead of a pair. Also, in the plasma cloud has a possibility of optical breakdown.

Let us analyze the evaporation process without taking into account the effect of the resulting steam to the process of propagation of the laser to the surface of the metal. However, limited to moderate radiation intensities. While metal evaporation process analysis is necessary to immediately distinguish between landline Mr. transient regimes is carried out using a continuous and pulsed laser radiation. Let us examine for starting transient process. We define a radiation intensity  $I$ , for which the metal in the absorbing layer heats up to a temperature above the crystallization temperature. The nature of the evaporation process in this case will depend on the duration and  $Q$  energy action  $\tau$  radiation. Let the fixed energy  $Q$ . If the value of  $\tau$  high, the heat has time to spread by conduction to a great depth, the temperature is not high, and therefore a small amount is vaporized metal. If  $\tau$  is small, the metal surface temperature is high, but the thickness of the heated layer is small, that means over a small amount of vaporized metal. From this it follows that the evaporation effect is maximal at a certain average value of  $\tau$ . Do not forget the depth of evaporation is an important characteristic for numerous practical applications, because it is the depth of the hole (holes), which can be done in the metal, or the

thickness of the sheet metal, which can be done through hole. There are two obvious possibilities for increasing the depth of evaporation: increase the intensity of radiation and the use of continuous radiation. The first possibility is limited by the rapid evaporation and screening pairs of metal, and the second - the type of laser used as a sufficiently high intensity of continuous radiation may I get only some lasers. During the use of laser technology to solve a variety of tasks commonly used continuous infrared radiation the CO<sub>2</sub>-laser and special devices, which enable the pair to remove the metal and melt as they are formed. If the selected laser power is small (solid-state, fiber lasers), it is necessary to use a Q-switched mode for low values of  $\tau$  the pulse of time.

The absorption, heating and melting processes induced by ultrashort laser pulses occur in very short time scales as can be seen in Figure 2.

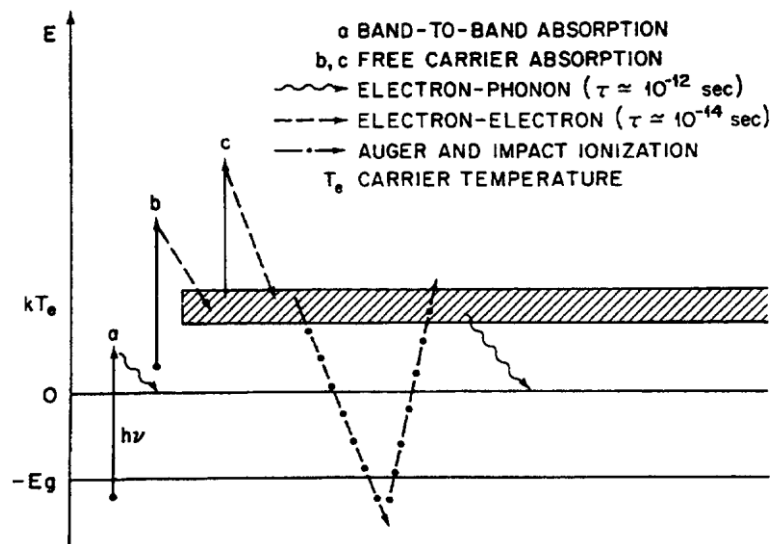


Figure 2 - Schematic diagram of the electronic excitations and of the energy transfer to the lattice upon intense laser irradiation. a, b, c correspond to the laser induced excitations.

The photons absorbed by the valence band electrons create a dense population of electron-hole pairs which thermalize within tens of femtoseconds via carrier-carrier scattering. Having reached a common temperature, they start to equilibrate with the cold lattice by electron-lattice collisions (phonon generation) accompanied by electron-hole relaxation via Auger process and inward spatial diffusion of carriers, due to carrier-density and temperature gradients. Agassi provides a phenomenological model which is able to calculate the electron-phonon relaxation

constant  $t_0$ , during lattice heating. He predicts  $t_0$  to be in the order of 0.4-1 ps for the case of ps pulse irradiation (20 ps) of Si and Ge.

At moderate carrier injection rates (i.e. for sufficiently long pulses or moderate peak powers), the electronic system and the lattice can be considered to be permanently in equilibrium and thus the melting process can be considered “thermal”. In this case nucleation of the melt occurs heterogeneously at the surface of the solid material. Following nucleation, a melt front forms which may propagate at extremely high velocities into the solid, with the upper limit being the speed of sound. For example it takes between 50 and 100 ps to melt a 20 nm surface layer of a Si wafer, providing melt-in interface velocities of 100 to 200 m/s.

At this point it is necessary to have a closer look to the influence of the pulse duration on the dynamics of the melting process. Already in 1986, Nicholas Blombergen pointed out that even pulses as short as tens of picoseconds act essentially as a very fast heating source inducing thermal melting as observed for ns pulses. The extremely high heating rates of  $10^{14}$  K/s attainable with ps pulses can lead however to superheatin\* of the solid by many hundreds of degrees as observed in GaAs by Fabricius and coworkers using 25 ps laser pulses.

The prediction of Blombergen has its physical basis in the fact that the characteristic phonon emission time in most solids is below or in the order of a few picoseconds. The thermal model assumes that the excess energy of photoexcited carriers relaxes rapidly to lattice vibrational modes, predominantly by the emission of longitudinal optical (LO) phonons. The phonon emission time is therefore the time required for a hot electron to emit a single LO phonon and consequently a measure for the time required to thermally heat the material. However, if the pulse duration is below the phonon emission time and the pulse peak power is sufficiently high, a huge amount of carriers can be excited from bonding to antibonding states leading to the softening of the lattice in a completely non-thermal process. Such a lattice softening has been proposed first by van Vechten in the 80’s in order to explain the results of ns laser pulse annealing of semiconductors. This model predicted correctly that Si

should melt non-thermally for free carrier densities above  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , but incorrectly that this could occur under ns pulse irradiation.

In fact, femtosecond laser pulses may produce both, thermal melting (as ns and ps pulses) or ultrafast non-thermal melting depending on the pulse fluence. This was demonstrated experimentally by Sokolowski-Tinten and coworkers who found that the transformation of GaAs into its liquid state occurs within several tens of picoseconds at fluences close to the melt threshold due to thermal melting under highly superheated conditions or within several hundreds of femtoseconds via carrier excitation for very high fluences. Based on a dynamic theory with a tight-binding formalism, the authors found that the lattice is not only softened by the removal of binding electrons but also by the dense electron-hole plasma which causes a displacement of the atoms. They calculated that a displacement of the atoms of more than  $1 \text{ \AA}$  from their equilibrium position occurs within less than 200 fs after the laser pulse. The gap between the conduction and the valence bands then vanishes and the symmetry of the diamond structure is destroyed. This has an important effect on the optical reflectivity which is expected to correspond to that of a metal.