

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Электронного образования
Специальность Оборудование и технологии сварочного производства
Кафедра Оборудование и технологии сварочного производства

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ/РАБОТА

Тема работы
Влияние параметров лазерной обработки на величину литого ядра и размер ЗТВ покрытий на основе быстрорежущей стали

УДК 621.793.048.7: 669.018.252.3.:621.373.826.

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-4601	Галушкина М.В.		30.05.2016

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гнюсов С.Ф.	д.т.н., профессор		30.05.2016

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Петухов О.Н.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гуляев М.В.	доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. Кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОТСП	Киселев А.С.	к.т.н., доцент		30.05.2016

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



Институт Электронного образования
 Специальность Оборудование и технологии сварочного производства
 Кафедра Оборудование и технологии сварочного производства

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ОТСП

_____ Киселев А.С.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Дипломная работа

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

Студенту:

Группа	ФИО
З-4601	Галушкина Мария Владимировна

Тема работы:

Влияние параметров лазерной обработки на величину литого ядра и размер ЗТВ покрытий на основе быстрорежущей стали	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	3779/С от 23.05.2016 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2016 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Комплект образцов из стали 20 с наплавленным покрытием на основе быстрорежущей стали 10P6M5, которое подвергалось лазерному оплавлению
---	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования;	1. Аналитический обзор литературы по теме исследования 2. Постановка задачи исследования 3. Материалы, оборудование и методы исследования 4. Экспериментальная часть
содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).	5. Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение 6. Социальная ответственность 7. Заключение
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	1. Название, цель и задачи работы 2. Материалы, оборудование и методы исследования 3. Экспериментальная часть 4. Экономическая часть и социальная ответственность 5. Выводы
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)	
Раздел	Консультант
1. Аналитический обзор литературы по теме исследования 2. Постановка задачи исследования 3. Материалы, оборудование и методы исследования 4. Экспериментальная часть 5. Заключение	Гнюсов Сергей Федорович
6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Петухов Олег Николаевич
7. Социальная ответственность	Гуляев Милий Всеволодович

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	11.01.2016 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гнюсов С.Ф.	д.т.н., проф.		11.01.2016

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-4601	Галушкина М.В.		11.01.2016

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



Институт _____ Электронного образования _____
 Направление подготовки 150202 Оборудование и технология сварочного производства _____
 Уровень образования _____ Высшее _____
 Кафедра _____ Оборудование и технология сварочного производства _____
 Период выполнения (весенний семестр 2016 учебного года) _____

Форма представления работы:

Дипломная работа
(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2016 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
12.02.2016	1. Аналитический обзор литературы по теме исследования	10
11.03.2016	2. Постановка задачи исследования	10
29.04.2016	3. Материалы, оборудование и методы исследования	10
25.05.2016	4. Экспериментальная часть	10
05.05.2016	5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
17.05.2016	6. Социальная ответственность	10
25.05.2016	7. Заключение	10
03.06.2016	8. Демонстрационные слайды	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гнюсов С.Ф.	д.т.н., профессор		11.01.2016

СОГЛАСОВАНО:

Зав. Кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОТСП	Киселев А.С.	к.т.н., доцент		11.01.2016

Реферат

Выпускная квалификационная работа – 74 с., 12 рисунков, 8 таблиц, 30 использованных источников.

Ключевые слова: лазерный нагрев, поверхностная лазерная обработка, текстурирование, комбинированная обработка, лазерная ударная обработка, лазерная закалка, оплавление, литое ядро, зона термического влияния.

Объектом исследования являются образцы композиционного покрытия на основе быстрорежущей стали (10P6M5 и 10P6M5 + 20 % WC).

Цель работы – исследование влияния параметров режимов точечного оплавления импульсным лазером на величину литой зоны и размер ЗТВ ранее сформированных покрытий на основе стали 10P6M5.

Предметом исследования является диаметр литого ядра и величина зоны термического влияния в зависимости от параметров режимов лазерной обработки.

Методом дискретного лазерного оплавления поверхности покрытий представляется возможным создавать на поверхности локальные зоны определённых форм, размеров и свойств, которые будут воспринимать основную нагрузку в процессе трения и, следовательно, увеличивать износостойкость.

Определения, обозначения, сокращения и нормативные ссылки

В настоящей работе применены следующие обозначения и сокращения:

- ЛО – лазерная обработка;
- ЗЛВ – зона лазерного влияния;
- ЛЯ – литое ядро;
- КПЭ – концентрированные потоки энергии;
- ЗТВ – зона термического влияния;
- ХТО – химико-термическая обработка;
- WC – карбид вольфрама.

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

- ГОСТ 12.1.003-83 – Шум. Общие требования безопасности;
- СНиП 23-03-2003 – Защита от шума;
- НРБ-99/2009 – Нормы радиационной безопасности;
- СН 245-71 – Санитарные нормы проектирования промышленных зданий.
- «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров» № 2392-81;
- Методические рекомендации «Гигиена труда при работе с лазерами», утвержденные МЗ РСФСР 27.04.81 г.;
- ГОСТ 24713-81 «Методы измерений параметров лазерного излучения»;
- Классификация: ГОСТ 24714-81 «Лазеры. Методы измерения параметров излучения»;
- Общие положения: ГОСТ 12.1.040-83 «Лазерная безопасность. Общие положения»;
- ГОСТ 12.1.031-81 «Лазеры. Методы дозиметрического контроля лазерного излучения».

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	9
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	11
1.1. Лазерный нагрев материала	11
1.2. Поверхностная лазерная обработка	12
1.3. Лазерная закалка	13
1.4. Лазерное текстурирование	21
1.5. Комбинированная обработка с применением лазера	23
1.6. Лазерная ударная обработка.....	25
1.7. Постановка задачи	26
2. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	29
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	35
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	39
4.1. Предпроектный анализ	39
4.2. Описание главных, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом	39
4.3. Определение значимости выполняемых функций объектом	41
4.4. Определение значимости функций	44
4.5. Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования	45
4.6. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ	47
4.7. Оптимизация функций выполняемых объектом	47

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	47
5.1. Производственная безопасность	49
5.1.1. Анализ выявленных вредных факторов	49
5.1.2. Анализ выявленных опасных факторов	57
5.2. Экологическая безопасность	63
5.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	64
5.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	67
Заключение	69
Список используемых источников.....	71

Введение

Поверхности пар трения работают в условиях высоких температур, агрессивных сред, и испытывают при этом циклические, знакопеременные и ударные нагрузки. При этом поверхностные слои материала подвергаются процессам деформации, передеформации, окисления и разрушения.

Прочностные и геометрические свойства поверхности – ключевые факторы, определяющие её износостойкость. Поэтому предварительной подготовке поверхности перед введением ее в эксплуатацию уделяется особое внимание. Поверхностная обработка – неотъемлемая часть технологического процесса упрочнения деталей машин, оборудования и обрабатываемого инструмента, которая позволяет увеличить долговечность и стойкость к изнашиванию в 2 - 5 раз. Для повышения износостойкости широко используются традиционные способы упрочнения: плазменно-дуговые методы нанесения композиционных покрытий, механические методы поверхностной обработки, термической и химико-термической обработки (ХТО).

В последнее время бурно развивается лазерная техника и технологии поверхностной термической обработки. Высокоскоростной локальный лазерный нагрев с последующим быстрым охлаждением в объём материала позволяет получить мелкодисперсную неравновесную структуру с широким комплексом свойств. При этом отсутствует механическое воздействие и коробление обрабатываемого изделия, что в сумме с лёгкой автоматизацией и быстрой окупаемостью оборудования, делает технологию лазерного поверхностного упрочнения достойным конкурентом традиционным методам обработки. Однако выбор параметров режима обработки поверхности лазером является *актуальной задачей* данной технологии. Поэтому множество исследований направлено на изучение закономерностей взаимодействия лазерного излучения с конструкционными материалами.

Максимальный упрочняющий эффект от поверхностной лазерной обработки удаётся получить в комбинированной технологии, когда лазерному

нагреву предшествуют операции ХТО или нанесения покрытия. Композиционные износостойкие покрытия на основе аустенитной (Fe-Cr-Ni, Fe-Mn) и аустенитно-мартенситной (10P6M5) матрицы с карбидными включениями хорошо себя зарекомендовали при эксплуатации в условиях высоких линейных скоростей и нагрузок. Главной особенностью данных материалов является способность превращения аустенита в мартенсит в процессе трения, что приводит к повышению их износостойкости. Однако в покрытие порошком стали 10P6M5 доля аустенита составляет 25...30% от общего объема матрицы. Увеличение объемной доли γ - фазы можно добиться методом дискретного лазерного оплавления поверхности покрытия. Этим способом представляется возможным создавать на поверхности локальные зоны определённых форм, размеров и свойств, которые будут воспринимать основную нагрузку в процессе трения.

На основании вышеизложенного **целью данной работы** является исследование влияния параметров режимов точечного оплавления импульсным лазером на величину литой зоны и размер ЗТВ ранее сформированных покрытий на основе стали 10P6M5.

К наиболее важным результатам данной работы можно отнести:

1. Подобраны параметры режимов лазерного облучения с точки зрения величины литого ядра и ширины зоны термического влияния.
2. Построены зависимости диаметра литого ядра и ширины ЗТВ от тока лазерного излучения и длительности импульса.

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В обзоре представлены результаты современных научных исследований в области поверхностной лазерной обработки (ЛО) конструкционных сплавов. Рассмотрено влияние процессов лазерного оплавления, закалки, текстурирования, ударного нагружения и комбинированной обработки на структуру и свойства материалов.

1.1. Лазерный нагрев материала

В основе нагрева материала лазером лежит процесс поглощения светового потока и передача его энергии тепловым колебанием решётки твёрдого тела [1, 2]. После разогрева материала следует его расплавление и испарение. Одновременно с этими стадиями происходят диффузионные и химические процессы, а также фазовые превращения.

Количество поглощённой энергии зависит от теплофизических и оптических свойств материала, которая уменьшается с увеличением длины волны излучения. Большая часть лазерного излучения 70 - 95% отражается от металлов. Отражающая способность материала достигает максимальных значений для полированных поверхностей. Полированные алюминий и медь при комнатной температуре отражают 97 и 99% излучения с длиной волны 10.6 мкм (CO₂ - лазер) соответственно [2].

Плотность излучения и время его воздействия определяют основные методы лазерной обработки: нагрев, плавление и ударное нагружение. Лазерный нагрев, приводящий к фазовым превращениям в поверхностном слое, требует минимальной плотности энергии излучения ($10^3 - 10^4$ Вт/см²) при времени его воздействия $10^{-3} - 10^{-2}$ с, в то время как для ударного воздействия требуется максимальная плотность энергии излучения ($10^8 - 10^{10}$ Вт/см²) при времени воздействия $10^{-9} - 10^{-6}$ с [1-3].

Для обработки различных материалов используются лазеры непрерывного и импульсного действия (CO₂ -, Nd:YAG – лазеры и различные

твердотельные лазеры). Лазерную обработку проводят на воздухе, в среде аргона, азота и их смесях.

Методы поверхностной лазерной обработки позволяют в широких диапазонах изменять структуру и свойства поверхностного слоя материала толщиной 0.05 – 5.0 мм, однако свойства и структура остального объёма материала остаются неизменными. Лазерное модифицирование поверхности деталей машин, ответственных узлов конструкций и различного оборудования широко используется как на зарубежных, так и на отечественных предприятиях самых различных отраслей (автостроение, авиастроение, медицина, дорожное и сельскохозяйственное машиностроение, обрабатывающий инструмент, нефтегазовая и горнодобывающая промышленность).

1.2. Поверхностная лазерная обработка

Условно процесс лазерной обработки можно разделить на три этапа: расчёт и выбор параметров, подготовка поверхности и облучение. От параметров облучения и состояния поверхности зависит размер, структура и свойства зоны лазерного влияния (ЗЛВ), которая может состоять из слоёв закалённых из жидкого и твёрдого состояния, а также ЗТВ.

К параметрам лазерной обработки относятся плотность излучения, скорость перемещения лазера или заготовки, коэффициент заполнения, длительность облучения при локальном точечном упрочнении, форма, длительность, частота следования и перекрытие импульсов при импульсной обработке, коэффициент перекрытия точек, дорожек, наличие защитной среды. Расчёт параметров производится из условия необходимой толщины закалённого слоя. При этом необходимо знать теплофизические свойства материала (теплопроводность, удельная теплоёмкость, а также плотность и температурные критические точки материала) [1-3].

Перед лазерной обработкой необходимо определённым образом подготовить поверхность заготовки для достижения максимально качественного результата. Подготовка поверхности состоит из шлифования,

полирования и нанесения поглощающего слоя (краски). Большая шероховатость поверхности приводит к образованию неравномерного упрочнённого слоя, что не допускается для ответственных конструкций. После полировки сильно увеличивается отражающая способность поверхности, поэтому её следует покрыть равномерным тонким слоем специальной краски. Исключением являются детали, прошедшие предварительную химико-термическую обработку (ХТО).

При облучении поверхности ключевую роль играет исходная структура материала, поэтому в ряде случаев перед ЛО проводят термическую обработку. Лазерная термообработка сталей позволяет получить упрочнённые слои с микротвёрдостью 9-13 ГПа. Лазерный нагрев успешно применяют в комбинированных технологиях, например борирование с последующим лазерным облучением [24], что приводит к увеличению микротвёрдости с 14 до 18 ГПа. Новый уровень эксплуатационных характеристик достигается финишной ЛО после наплавки, напыления и осаждения, ХТО [8, 24, 27].

Эффект упрочнения при ЛО металлов и сплавов достигается в результате комплекса процессов, протекающих в материале: мартенситное превращение, растворение карбидов, насыщение матрицы их компонентами, высокотемпературный наклеп, повышение плотности дефектов кристаллического строения и пластические сдвиги. Длительность существования градиента температур при лазерной закалке составляет 10^{-3} – 10^{-6} секунд. За это время в поверхностных слоях происходят процессы, обеспечивающие аустенитизацию, растворение избыточных фаз и частичную диффузию [2]. Весь цикл оплавления и остывания материала до комнатной температуры длится не больше 1-2 секунд.

Основные методы поверхностной лазерной обработки – закалка и легирование распространены не очень хорошо, что связано с недостаточной изученностью и сложностью процессов структурных и фазовых превращений, локальной пластической деформации, происходящих в упрочняемом объёме различных металлов и сплавов. ЛО позволяет улучшить целый комплекс

характеристик: шероховатость, твёрдость, износостойкость, коррозионную стойкость, адгезионную прочность, выносливость при знакопеременных нагрузках, жаростойкость, гидрофобность и др.

1.3. Лазерная закалка

Процесс лазерной закалки проводят с оплавлением и без оплавления поверхности. В сплавах с высоким содержанием легирующих элементов при оплавлении происходит частичное или полное растворение карбидной фазы в аустените, что приводит к разупрочнению материала. Поэтому для средне- и высоколегированных сталей рекомендуется проводить лазерную закалку без оплавления или с минимальным оплавлением (5 - 20 мкм). При оплавлении низколегированных сталей образуется мелкодисперсная мартенситная структура (90%) с максимальной твёрдостью. Однако при этом страдает качество поверхности, а именно увеличивается шероховатость, и может потребоваться дополнительная механическая обработка – шлифование. Проведение лазерной закалки без оплавления (или с минимальным оплавлением) для этой группы сталей позволяет получить не только достаточно высокие значения твёрдости, а также значительно снизить шероховатость и коэффициент трения поверхности. В работе [6] исследовано влияние скорости перемещения лазера на изменение микрогеометрии поверхности. Облучение проводили на скоростях 10 – 30 мм/с (мощность $P = 0.9$ кВт, диаметр пучка $d = 4$ мм). В диапазоне скоростей обработки 10 – 18 мм/с качество поверхности значительно ухудшается, увеличиваются высотные характеристики шероховатости. При дальнейшем увеличении скорости обработки происходит уменьшение шероховатости, так при 30 мм/с получены значения шероховатости R_a равные 1.25 и 0.62 мкм при исходных значениях 2.7 и 1.1 мкм соответственно.

С помощью лазера обрабатывают всю поверхность или локальные зоны – дискретная обработка. При обработке относительно больших площадей встречаются места перекрытия рядов упрочнения. Это приводит к появлению

участков материала, которые подвергались лазерному нагреву 2 - 4 раза. Известно, что распределение энергии по сечению лазера неравномерное [17]: в центре пучка энергия выше, чем на периферии при использовании фокусирующего призмного раstra. Следствием этого является снижение температуры нагрева от центра пятна к периферии. Поэтому в местах перекрытия материал нагревается меньше, чем в центре зоны облучения. В этом случае в местах перекрытия возможен отпуск материала и снижение его твёрдости, что приводит к образованию мягких зон, рис. 1б [1]. Однако авторами [3] обнаружено, что в зонах перекрытия при обработке оптоволоконным лазером стали X12МФ и чугуна СЧ21 твёрдость выше на 10 и 35% соответственно, чем в участках, подверженных однократному облучению, рис. 1а. На рис. 1б видно, что коэффициент перекрытия точек меньше, чем на рис.1а.

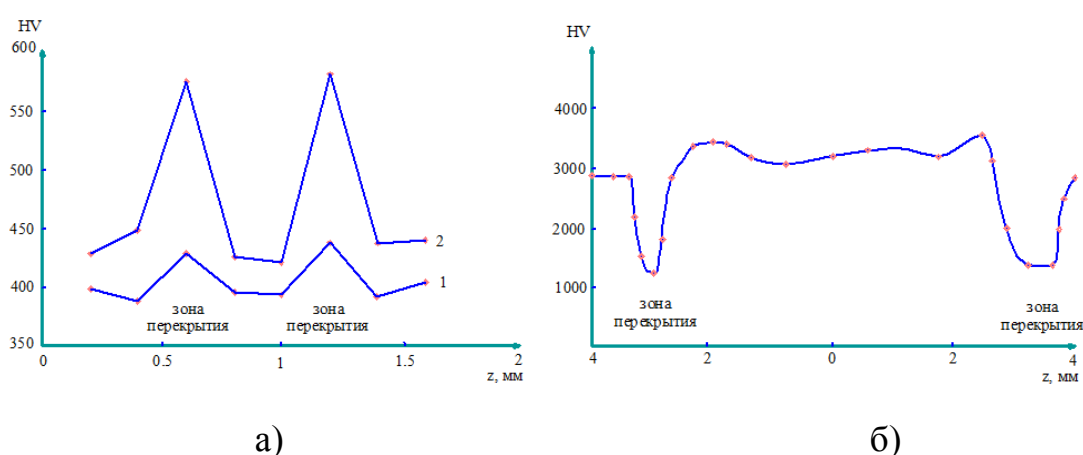


Рисунок 1 - Распространение микротвердости по ширине обработанного участка. 1 – X12МФ; 2 – СЧ21 – а) [3], перлитный серый чугун, микротвёрдость измерена на глубине 0.2 мм – б).

Дискретное лазерное упрочнение часто применяют для упрочнения колёсной стали [5], а также детали, работающие в условиях высоконагруженного трения скольжения и качения. Дискретные зоны упрочнения представляют собой участки в виде точек 1-3 мм в диаметре, прямые или зигзагообразные ломанные линии, которые расположены по всей поверхности трения на определённом расстоянии друг от друга [5-8]. Доля обработанной поверхности при локальном упрочнении определяется

коэффициентом заполнения (K_z) [6]. В работах [7, 8] для различных сплавов и покрытий проводилась лазерная обработка с коэффициентом заполнения поверхности $K_z = 0.25 - 0.8$, при этих значениях были получены положительные результаты в уменьшении шероховатости, коэффициента трения, и повышении износостойкости. В настоящее время нет общепризнанных рекомендаций по выбору параметров покрытий дискретного типа, их физико-механических и геометрических характеристик, обеспечивающих высокие показатели износостойкости рабочих поверхностей.

Исследователи [8] обнаружили, что лазерная обработка покрытия на основе никеля, сформированного плазменным напылением, приводит к уменьшению шероховатости оплавленной зоны в 2 раза. Поверхность цилиндрических образцов, обработанная с $K_z = 0.25$ и углом наклона дорожек упрочнения к основанию образца равным 45° , показала увеличение износостойкости в 2 раза по сравнению с основным покрытием. Для покрытия использовался углекислотный лазер мощностью 1.7 кВт. При обработке данного покрытия лазером мощностью 1.26 кВт, оптимальными параметрами для увеличения износостойкости покрытия были $K_z = 0.35-0.45$ и угол параллельных треков обработки 45° .

Дискретную обработку лазером ещё проводят с целью повышения выносливости материала. Учёные [9] заметили, что крылья стрекозы представляют собой конструкцию, в которой жёсткий сетчатый каркас (ферма) препятствует распространению трещин по крыльям насекомого. Так называемое биомиметическое упрочнение было применено на сплаве Mg–9Al–Zn. Поверхность конструкционного сплава была обработана взаимно перпендикулярными треками толщиной 0.6 мм с помощью неодимового лазера мощностью 300 Вт. Поверхность сплава после обработки похожа на сетку с квадратной ячейкой из исходного материала. В оплавленных объёмах выделяются упрочняющие частицы $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$, которые приводят к увеличению микротвёрдости на 80%. При этом было замечено, что такая обработка с образованием квадратной ячейки из основного материала размером

2 мм, на порядок увеличивает трещиностойкость и тем самым повышает усталостную прочность материала.

Для получения максимального эффекта от лазерной закалки, необходимо подобрать оптимальные параметры мощности излучения, длительности импульса. Бровер А. В. [2] установила влияние мощности излучения на твёрдость материала. Для обработки стали У8 волоконным лазером выбрали мощность излучения 0.5, 1 и 1.5 кВт, скорость сканирования 10 мм/с, значения микротвёрдости после обработки были равны 600, 900, 550 HV соответственно. В действительности, подобную зависимость значений твёрдости стали 45 от мощности лазера обнаружила Дощечкина И. В. [4]. На рис. 2 представлены зависимости микротвёрдости и величины износа от плотности излучения при ЛО сплава Д16.

Исходная структура материала главным образом оказывает влияние на подбор параметров обработки лазерного облучения, структуру и свойства упрочнённой зоны. На рис. 3 представлена зависимость микротвёрдости низко- и среднеуглеродистых сталей от длительности импульса и предварительной термической обработки. Так для стали 45 после предварительной ТО улучшение максимальной твёрдости 8 ГПа авторам [11] удалось получить после ЛО при длительности импульса 0.25 мс, рис 4а. Для нормализованной стали 45 при длительности импульса ЛО 0.2 мс предоставляется возможным получить твёрдость 12 ГПа и выше, рис 3б. При дальнейшем увеличении импульса до 0.25 мс происходит резкий спад микротвёрдости до 7 ГПа.

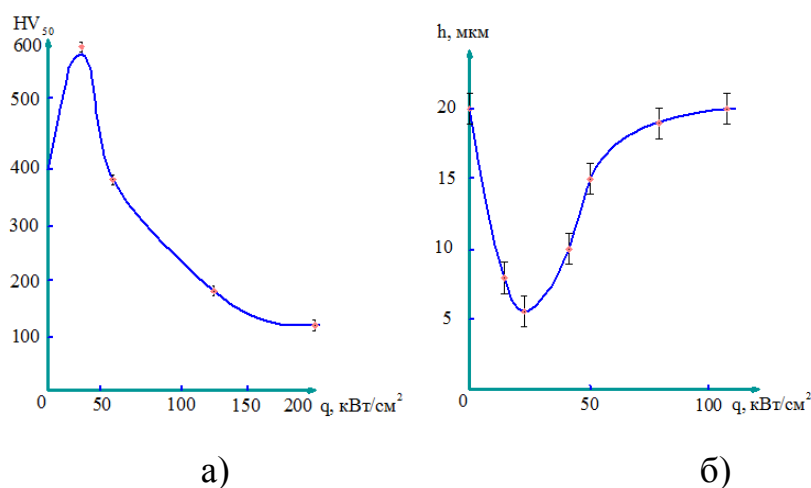
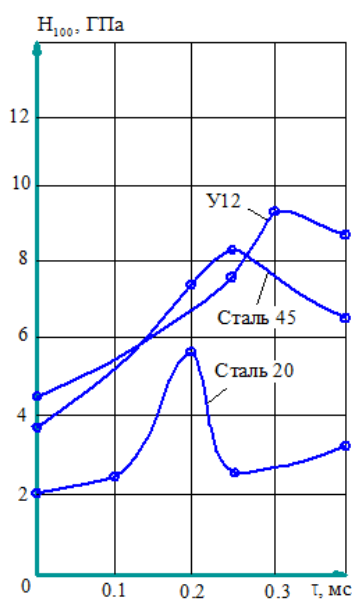
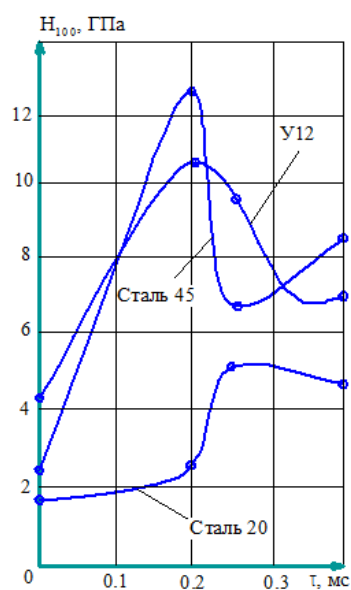


Рисунок 2 – Влияние плотности излучения на: микротвёрдость – а), величину износа – б) сплава Д16.

Большим преимуществом лазерной заковки является упрочнение низкоуглеродистых сталей, которые не поддаются заковке традиционным методом объёмной термической обработки. Надёжным критерием лазерной заковки углеродистых сталей служит количество углерода в стали, чем его больше, тем сильнее эффект упрочнения после лазерного облучения. В случае легированных сталей, в роли показателя возможности лазерного упрочнения может выступить эквивалент углерода [20]. Например, лазерное облучение стали 12Х18Н9Т не приводит к изменениям микроструктуры и твёрдости материала, отсутствует эффект упрочнения. Оплавление поверхности быстрорежущих и высоколегированных сталей приводит к падению твёрдости в переплавленном объёме.



а)



б)

Рисунок 3 - Зависимость микротвердости углеродистых сталей от длительности импульса: а) режим 1 (предварительная термическая обработка – заковка и высокий отпуск); б) режим 2 (предварительная термическая обработка – нормализация).

Лазерную заковку для ряда материалов проводят в воздушной атмосфере, что приводит к образованию оксидной плёнки на поверхности.

Авторы [18] изучали влияние защитной среды на химический состав поверхностных слоёв. Исследователи подвергали лазерному облучению инструментальные стали в среде аргона, азота и их смесях. Использование аргона привело к образованию большого количества карбидов хрома и железа в оплавленном объёме материала. Применение азота и его смеси с аргоном способствовало образованию большого количества нитридов железа и хрома. Использование защитной атмосферы влияет не только на степень упрочнения стали, а также изменение его электрохимического потенциала, от которого зависят коррозионные свойства материала. Лазерная закалка сложнолегированного режущего инструмента на воздухе приводит к образованию многокомпонентных оксидных плёнок на основе Fe, Cr, Mo, W толщиной не более 0.20 мкм. Данные окислы весьма положительно влияют на расширение диапазонов режимов резания, при которых достигается наименьший износ инструмента.

Несмотря на сверхвысокую скорость охлаждения нагретого материала 10^6 - 10^7 К/с при лазерном оплавлении, существуют исследования в которых используют дополнительный отвод тепла при ЛО. Применение теплоотвода в виде подкладки под обрабатываемый образец при лазерной термической обработке оказывает влияние на увеличение прокаливаемости средней твёрдости стали [11]. В этой работе описано влияние теплоотвода на эффективное время диффузии углерода. Китайские учёные провели исследование, в котором в качестве дополнительного теплоотвода использовали жидкий азот. Лазерная обработка магниевого сплава с таким мощным охлаждением показала увеличение износостойкости на 40% по сравнению с ЛО без использования жидкого азота. Дополнительное охлаждение увеличивает дисперсность зерна и снижает долю остаточного аустенита, что приводит к увеличению твёрдости материала.

В работе [26] разработана технология лазерного упрочнения больших цилиндров, которая позволяет получить закалённый слой 2 мм с равномерным распределением твёрдости по его толщине, а также постоянной твёрдостью по

всей поверхности цилиндра. Разработанная технология включает оптимальные параметры режима обработки (скорость сканирования лазером и скорость вращения цилиндра), а также использование кольцевого водяного охлаждения, что отсутствовало в старой технологии. Такой подход позволяет исключить образование мягких зон на поверхности цилиндра и сформировать однородную мартенситную структуру с минимальным количеством остаточного аустенита.

В настоящее время поверхностная лазерная обработка ответственных деталей машин и обрабатываемого инструмента – перспективная и быстро окупаемая технология, в которой нуждается масса отечественных предприятий лёгкой и тяжелой промышленности. Огромное количество экспериментальных исследований в области лазерного упрочнения показывают эффективность применения лазерного излучения в упрочнении поверхности. Лазерный луч позволяет улучшить целый комплекс эксплуатационных характеристик материала. Обработка поверхности с применением концентрированных потоков энергии (КПЭ) успешно используется на различных авиа-, автомобилестроительных, обрабатывающих предприятиях.

Горячекатаная обработка материалов является весьма важным процессом на производстве, в котором простой оборудования приводит к серьёзным финансовым потерям. Основным оборудованием для горячекатаной обработки являются прокатные станы, в которых основная ответственность ложится на валки. Для предотвращения потерь производства увеличивают долговечность прокатных валков методом лазерного нагрева. На модифицированной поверхности в условиях горячего изнашивания образуется защитный оксидный слой, который значительно повышает износостойкость валков.

Работы [13-16] связаны с лазерной обработкой деталей транспортной промышленности. Повышение износостойкости и уменьшение степени выкрашивания зубчатых колес после ЛО описано в [13]. Упрочнение клапана двигателя из чугуна представлено в [14]. Подбор параметров режимов ЛО для рессорно-пружинной стали 50ХГФА [15], низкоуглеродистой

стали для автомобильного применения и алюминиевых сплавов. В работе [16] разработана технология упрочнения внешней резьбы насосно-компрессорных труб, применяющихся для спускоподъёмных операций (СПО). Обычно резьба на данных трубах выдерживает 5-6 СПО. После ЛО резьбы по боковой поверхности количество СПО насосно-компрессорных труб увеличивается до 20.

Масса исследовательских работ проделана в области ЛО обрабатывающего инструмента [17-20]. Большой вклад в развитие упрочняющей лазерной обработки внёс Ярьсько С. И. В своей работе [17] он предложил и обосновал новый системный методологический подход к анализу эффективности ЛО металлорежущего инструмента, который основан на комплексном исследовании влияния на его стойкость основных физико-технологических параметров, характеризующих как процесс упрочнения, так и процесс резания.

1.4. Лазерное текстурирование

Одним из перспективных методов изменения морфологии поверхности является лазерное текстурирование. С помощью лазерного луча предоставляется возможным подплавлять или испарять микрообъёмы материала, формируя на поверхности микроямки и микровыступы. При лазерном текстурировании поверхности происходят процессы закалки поверхностных слоёв. В работах [8, 9, 20, 21, 23] приведены результаты исследований влияния лазерного текстурирования на морфологию и свойства поверхности.

Авторами исследования [20] рассмотрено влияние режимов облучения на морфологию поверхности нержавеющей стали 304. При облучении поверхности короткими импульсами ($\leq 0,1$ мс) и низкой плотности энергии ($\sim 10^6$ Дж/м²) образуются кратеры и выплески материала. При облучении поверхности длинными импульсами ($> 0,1$ мс) и повышенной плотностью энергии ($\sim 10^7$ Дж/м²) образуются оплавленные зоны округлой формы без

выплесков металла, оплавленная поверхность с небольшим углублением. Углубление тем меньше, чем больше длительность импульса и плотность энергии лазерного излучения.

Лазерное микротекстурирование поверхности титанового сплава (ТС11) [21]. После лазерного облучения ТС11 на поверхности образуются микроуглубления. В ходе испытания на сухой износ при температуре 500 °С в эти углубления попадают продукты износа, содержащие титан, который окисляется с кислородом и образует защитную плёнку, что приводит к увеличению износостойкости на 50%.

В статье [8] описывается лазерное текстурирование поверхности с образованием микроямок, что приводит к увеличению износа на этапе приработки, однако при этом гораздо быстрее происходит смена режима смазки от жидкой к смешанной. При смешанном режиме смазки уменьшается коэффициент трения в 2 раза, что приводит к увеличению износостойкости пары трения. Данная обработка эффективно может применяться в парах трения, где допускается большой износ на начальном этапе приработки.

В работе [20] для текстурирования нержавеющей стали 304 и 316 использовали наносекундное воздействие лазера. В ходе эксперимента варьировались такие параметры, как энергия импульса (0.1-0.8 мДж), число импульсов и коэффициент перекрытия импульсов. С увеличением коэффициента перекрытия импульсов и их количества происходит увеличение шероховатости, коэффициента трения и микротвёрдости. На поверхности образуется толстая прочная оксидная плёнка, которая положительно влияет на повышение характеристик износостойкости, а именно даёт возможность применять данную обработку для высоконагруженных пар трения.

Текстурирование магниевого сплава при изменении энергии импульса, скорости сканирования, частоты повторения импульсов приводит к образованию 3-х различных рельефов: однонаправленная поверхность, гомогенная поверхность, поверхность с выросшими частицами. Шероховатость

поверхности изменяется от 0.2 мкм до 4.5 в зависимости от параметров обработки [23].

Лазерное текстурирование поверхности циркониевого сплава методом лазерной абляции позволяет получить необходимый рельеф с минимальной шероховатостью для достижения гидрофобности поверхности. При этом в поверхностном слое образуются сжимающие остаточные напряжения 1.6 ГПа, что приводит к увеличению твёрдости и снижению трещиностойкости упрочнённого слоя [22].

1.5. Комбинированная обработка с применением лазера

Лазерный нагрев широко применяется в комбинированных упрочняющих технологиях. Воздействие лазера на сформированное покрытие, позволяет повысить его прочностные свойства, а также оказывать благоприятное воздействие на морфологию поверхности (снизить шероховатость, коэффициент трения, пористость, увеличить коррозионную стойкость). Приведём примеры комбинированных упрочняющих технологий с применением лазерного нагрева.

Никелевое покрытие, сформированное плазменным напылением, имеет пористую поверхность и местами плохое сцепление с основным материалом. Последующее лазерное оплавление покрытия залечивает поры, уменьшает шероховатость в 2 раза и увеличивает адгезионную прочность сцепления покрытия с подложкой в местах оплавления [8, 23]. Данное покрытие обрабатывали локально – упрочняли дискретно. Лазерному оплавлению подвергалось 25% от общей площади поверхности ($K_3 = 0.25$), что привело к увеличению износостойкости в 2 раза, по сравнению с необработанным покрытием.

Один из самых эффективных методов поверхностной комбинированной обработки является ХТО + ЛО. Лазерный нагрев позволяет увеличить величину упрочнённого слоя методом ХТО, улучшить упругопластические свойства, увеличить трибологические характеристики [24-27].

В работе [24] поверхность сплава Cr12MoV подвергали борированию и лазерной закалке, после чего испытывали на усталостное разрушение. В результате получили значения усталостной прочности исходного, борированного и борированного с ЛО образцов 368 МПа, 388 МПа и 422 МПа, соответственно. Разрушение обработанного лазером образца носит характер транскристаллитного. ЛО представляется возможным снизить хрупкость поверхности.

Модифицирование поверхности стали 30CrMnSiA с помощью плазменного нитрования и лазерного оплавления представлено в исследовании [25]. Комбинированная обработка позволяет уменьшить интенсивность изнашивания поверхности в 6 раз благодаря снижению коэффициента трения и образованию защитной оксидной плёнки. Такая комбинированная обработка позволяет получить более толстый модифицированный слой по сравнению с ЛО или плазменным нитрованием, что благоприятно сказывается на трибологических характеристиках поверхности.

Сложная комбинированная обработка среднеуглеродистой стали - бороникелированное покрытие подвергается традиционной закалке и лазерному оплавлению. В результате такой обработки с применением лазерного нагрева получается сложная структура, состоящая из боридов никеля и железа, а также эвтектики из боридов и цементита. Лазерное оплавление бороникелированного покрытия улучшает свойства малоциклового усталости [25]. Тройная обработка быстрорежущей стали Р6М5: карбонитрация, ЛО, вакуумно-плазменное покрытие TiN [26]. Карбонитрация увеличивает износостойкость и теплостойкость, а также повышает теплопроводность стали. Последующая ЛО также повышает износостойкость и уменьшает теплопроводность стали. А нанесение покрытия TiN в сумме с предыдущими обработками изменяет процесс схватывания режущего инструмента с деталью: уменьшаются силы резания длина контакта стружки с передней поверхностью резца.

Сочетание лазерного нагрева с последующим механическим ударным воздействием также благотворно сказывается на прочностных и морфологических свойствах поверхности [27]. Лазерное оплавление поверхности шестерни коробки передач приводит к образованию большого количества остаточного аустенита, увеличению шероховатости и снятию остаточных напряжений. А последующая дробеструйная обработка снижает не только шероховатость поверхности, а также объёмную долю остаточного аустенита в поверхностном слое. При этом появляются остаточные сжимающие напряжения до 1000 МПа в поверхностном слое 300 мкм, что увеличивает срок службы шестерни коробки передач.

1.6. Лазерная ударная обработка.

Серия работ [28, 29] посвящена исследованию влияния наносекундного точечного лазерного ударного воздействия на структуру и свойства нержавеющей аустенитной стали 304. Для защиты поверхности от теплового влияния использовалась водная защита – слой воды толщиной 1-2 мм. Поверхность после нагружения лазера не оплавлялась, а подвергалась только механическому нагружению.

Одинокое ударное воздействие на сталь 304 приводит к образованию остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое 300 МПа, величина которых снижается по мере удаления от поверхности на глубину до 1 мм. Ударная лазерная обработка позволяет повысить значения нанотвёрдости и модуля упругости стали 304. В микроструктуре обнаружены зёрна с высокой плотностью дислокаций, которым отводится роль увеличения нанотвёрдости. В поверхностном слое происходит измельчение размера зерна в 2-4 раза. Огромную роль в измельчении играют двойники деформации [28].

Работа [29] продолжение предыдущей работы. Авторы исследовали изменение микроструктуры аустенитной стали 304 после многократного ударного нагружения наносекундным лазером. Многократная лазерная обработка приводит к сильному измельчению структуры и образованию

субмикронных зёрен. После одноразового ударного лазерного воздействия происходит образование механических двойников только в одном направлении. При повторном ударном воздействии происходит образование двойников деформации уже в другом направлении. После ещё одного нагружения образуются двойники в третьем направлении. Таким образом, технология многократного лазерного ударного воздействия лазера позволяет добиться сильного измельчения зерна аустенитной стали 304.

Лазерная ударная обработка (ЛУО) позволяет улучшить прочностные характеристики при растяжении образцов из стали 304. Одиночное и двойное облучение стержня точечным лазером с перекрытием точек 50% позволяет увеличить предел упругости, текучести, прочности для скоростей деформации 10^{-4} - 10^{-1} с⁻¹. После разрыва образцов был исследован излом. Изломы обработанных и необработанных образцов носили ямочный характер. С увеличением скорости деформации размер ямочек излома уменьшается. В изломе образцов после ЛУО обнаружены ямочки более мелкого размера, чем в необработанных.

1.7. Постановка задачи

Важной задачей производства является применение высокотехнологичных высокоэффективных методов поверхностного упрочнения с целью увеличения срока службы изделия и достижения экономического эффекта. В наше время эта задача решается с помощью применения концентрированных потоков энергии для поверхностного упрочнения и легирования деталей машин, технологической оснастки и металлообрабатывающего инструмента. Особенностью применяемых методов поверхностного упрочнения КПЭ является возможность целенаправленной организации структуры поверхностных слоёв за счёт направленной кристаллизации, дисперсного упрочнения в условиях гиперскоростного $\alpha \rightarrow \gamma$ -перехода [1-6].

В настоящее время применяется множество технологий поверхностного упрочнения с использованием высококонцентрированных потоков энергии с применением лазерного и электронно-лучевого оборудования, как наиболее производительного и зарекомендовавшего с точки зрения качества обработки и отсутствия необходимости проведения финишной обработки поверхности. Наряду с этим успешно развиваются комбинированные технологии с применением КПЭ [8, 23-25]. Хорошо себя зарекомендовали методы поверхностной обработки, сочетающие последовательность: ХТО и лазерный нагрев, нанесение покрытий и лазерное оплавление, лазерное текстурирование и осаждение покрытий. Однако технологии поверхностной комбинированной обработки с применением высококонцентрированных потоков энергии изучены и распространены недостаточно широко.

Процесс наплавки композиционных покрытий на рабочие поверхности высоконагруженных пар трения – наиболее эффективный способ увеличить их срок службы. Последующая лазерная обработка поверхности наплавленных композиционных слоёв предоставляет возможность вывести покрытие на новый уровень эксплуатационных характеристик. Однако на сегодняшний день, нет общепринятых рекомендаций по выбору материалов и режимов для комбинированной технологии наплавки и оплавления с помощью КПЭ.

В этой связи актуальной задачей является изучение закономерностей взаимодействия лазерного излучения с композиционными покрытиями с целью достижения высоких эксплуатационных характеристик материала.

Целью данной работы является исследование влияния параметров режимов точечного оплавления импульсным лазером на величину литой зоны и размер ЗТВ ранее сформированных покрытий на основе стали 10P6M5.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

3. Изготовить образцы покрытий, наплавленные порошком быстрорежущей стали 10P6M5 и композиционной смесью порошков 10P6M5 + 20% WC.

4. Подготовить поверхность образцов для лазерной обработки.
5. Подобрать параметры режимов лазерного облучения.
6. Измерить величину литого ядра и ширину зоны термического влияния.
7. Построить зависимости диаметра литого ядра и ширины ЗТВ от тока лазерного излучения и длительности импульса

2. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для лазерной обработки использовали покрытия, которые были получены методом электронно-лучевой наплавки в вакууме. В качестве наплавочных материалов использовали порошок быстрорежущей стали 10P6M5 и композиционную смесь порошков 10P6M5 + 20% WC. Упрочняющие слои наплавлялись на подложку, изготовленную из стали 20. Химический состав подложки и наплавочного порошка приведён в таблице 1.

Таблица 1 – химический состав стали 20 и порошка 10P6M5 (% вес.)

	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As	W	V	Mo	O ₂	Fe
Сталь 20	0.2	0.25	0.4	< 0.25	< 0.04	< 0.04	< 0.25	< 0.25	< 0.08	-	-	-	-	Осн.
Порошок 10P6M5	1	< 0.5	< 0.55	< 0.4	< 0.3	-	4	-	-	6.5	1.5	5	< 0.03	Осн.

Подробная методика нанесения композиционного покрытия описана в работе [30].

Исходная микроструктура упрочненного слоя на основе стали 10P6M5 представляет собой мартенситно-аустенитную матрицу (85:15), в которой распределена карбидная фаза. Упрочняющая фаза в покрытиях представлена карбидами M_6C , M_2C и VC. Карбид M_6C расположен по границам зерен матрицы в виде эвтектической сетки. Его средний размер равен 3,8 мкм, объемная доля – ~10,5%. Второй морфологический тип карбидов это дисперсные вытянутые карбиды типа M_2C (средний размер в радиальном направлении $L_p = 1,35$ мкм, в тангенциальном – $L_t = 0,35$ мкм), расположенные внутри зерен матрицы. Карбид ванадия представлен отдельными округлыми выделениями в основном расположенными вблизи эвтектических карбидов типа M_6C . Средний размер частиц карбида ванадия равен 0,65 мкм, а их объемная доля не превышает 0,9%. Для покрытия сталь 10P6M5+20% WC эвтектический карбид M_6C имеет средний размер 5,9 мкм (~15% об.), карбид M_2C – 0,35 мкм (~10% об.) и VC – 0,65 мкм (0,9% об.). Матрица находится в аустенитно-мартенситном состоянии (~50:50 %).

Проводили лазерное облучение плоской поверхности покрытий размером 30×30 (10P6M5 + 20% WC) мм и 30×10 мм (10P6M5). Данная поверхность перед оплавлением подвергалась механическому шлифованию и полированию на алмазных пастах различной дисперсности. На рисунке 4 представлены фотографии образцов, которые подвергались лазерной обработке.

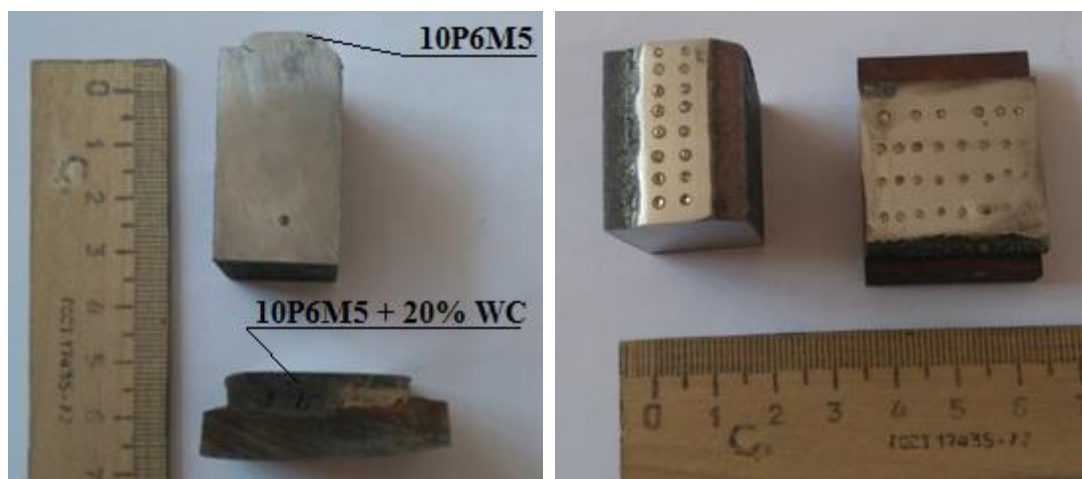


Рисунок 4 – образцы композиционного покрытия на основе быстрорежущей стали после лазерной обработки

Для оплавления образцов применялся лазерный комплекс ЛТА4-2 - полуавтоматический аппарат для импульсной сварки с микропроцессорным управлением энергией, частотой повторения, длительностью и формой импульса излучения. Комплекс, рис. 5, предназначен для выполнения сварочных работ при производстве приборов электронной техники, точного приборостроения, ювелирных и медицинских изделий, как в условиях промышленного производства, так и в малых мастерских. С помощью данного комплекса обрабатывают следующие материалы: черная и нержавеющая сталь, титан, алюминий, медь, тугоплавкие металлы и сплавы, разнородные материалы. Лазерный комплекс ЛТА4-2 имеет отличительные особенности.

- Повышенные энергетические параметры и широкие возможности по управлению энергией, частотой повторения, длительностью и формой импульса излучения лазера;

- Использование компонент нового поколения с повышенной надежностью;
- Гибкая модульная компоновка с «открытой архитектурой» разработанная с учетом требований эргономики;
- Возможность расширения рабочих функций за счет опций и модернизации модулей;
- Большое число приводов и приспособлений входящих в состав базового комплекта поставки (съемный стол оператора с предметным столом, который может устанавливаться на различной высоте, и снабжен механизмом прецизионного перемещения по оси Z, пульт управления, педаль, оптическая система - с телевизионным наблюдением, привода для перемещения деталей)



Рисунок 5 – лазерный комплекс ЛТА4-2

В состав комплекса ЛТА4-2 входят: лазер, оптическая система, кинематическая схема, блоки питания, охлаждения и контроля, технологические модули (пневматическая система, функциональные модули и рабочее место).

Лазерный излучатель, работающий на основе неодимового Nd: YAG – лазера с ламповой накачкой, снабжён пылезащитным кожухом. Используются квантроны с разъемными металлокерамическими отражателями исключающие необходимость подстройки резонатора при смене ламп. *Оптическая система*

содержит телескоп с регулируемой кратностью, сменные объективы, телевизионную систему наведения и наблюдения. Обеспечивает двуканальную регулировку размеров лазерного пятна, регулировку глубины фокусировки визуального канала, изменение диаметра пятна путем заглубливание фокуса без изменения глубины фокусировки (резкости) визуального канала. *Кинематическая система* состоит из прецизионного Z-стола с ручным приводом вертикального перемещения изделия, ф-привода для обработки деталей вращения и привода для линейного перемещения детали для автоматической сварки круговых и линейных швов. *Блок питания* ламп обеспечивает регулировку формы и длительности импульса излучения. *Система охлаждения* двухконтурная термостабилизированная с управлением расходом жидкости от внешнего контура. *Пневматическая система* содержит набор сопел для поддува газа, газовые соединители и шланги, фильтр регулятор, электроуправляемые клапана, ротаметр. *Функциональные модули* включают Т - образный предметный стол для закрепления изделий, ручной ХУ стол и освещение. *Рабочее место оператора* выполнено с учетом требований по эргономике, обеспечивает подстройку предметного стола и оптической системы по высоте содержит монитор ТВ системы, педаль, пульт управления параметрами лазера, оптической системы, приводами кинематической системы, индикаторы контроля параметров лазерного излучения и технологических режимов. Краткие технические данные и характеристики лазерного комплекса ЛТА4-2 представлены в таблице 2.

Таблица 2 – технические характеристики комплекса ЛТА4-2

Наименование параметров	Значение параметров
Параметры лазера	
Длина волны излучения, мкм	1.064
Частота следования импульсов излучения, Гц	0.1 – 50
Длительность импульса, мс, регулируемая в пределах	0.5 – 20

Максимальная средняя мощность излучения, Вт	До 250
Максимальная энергия в импульсе, Дж	До 50
Параметры оптической системы	
Фокусное расстояние силового объектива, мм	100
Рабочий диапазон длин волн объектива, мкм	1.064 и 0.52
Размер пятна излучения в зоне обработки, мм	0.3 – 2.0
Технологические возможности	
Диапазон скоростей сварки (линейный привод), мм/сек	0.1 – 10.0
Автоматизированная или ручная подача газа или воздуха в зону сварки	

Поверхность наплавки облучалась одиночными импульсам без перекрытия точечных зон. Газовая защита не применялась. При облучении варьировались длительность импульса и сила тока, от которых зависит энергия излучения, таблица 3.

Таблица 3 – параметры режимов лазерной обработки

Е, Дж												
	I, А											
τ, мс	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
5	2.2	3.2	4.2	5.3	6.3	7.7	9.0	10.5				
10	3.8	6.15	8.2	10.15	12.4	15.1	17.5	19.7	21.2	24.3	26.2	31.2
15	5.5	8.5	11.2	14.4	17.6	19.9	23.7	26.8	29.4	33.2	36.3	42.2
20	7.1	10.8	13.8	17.8	20.8	25.7	29.5	34	36.1	40.6	45.1	51.2

С увеличением длительности импульса и силы тока импульса возрастает энергия излучения по линейному закону, рис. 6. Максимальные значения энергии излучения наблюдаются при максимальных значениях силы тока и длительности импульса лазерного излучения.

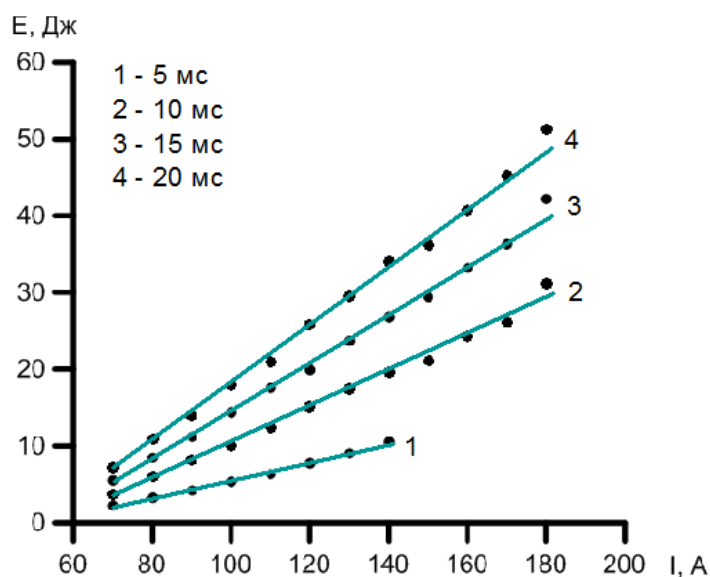


Рисунок 6 – зависимость энергии лазерного излучения от силы тока лазерного импульса

Для выявления литого ядра (ЛЯ) и зоны термического влияния (ЗТВ), облучённые образцы подвергались шлифованию на алмазных пастах различной дисперсности, полированию на фетре и травлению в 6% спиртовом растворе азотной кислоты. Исследование диаметра ЛЯ и величины ЗТВ проводилось с помощью оптического микроскопа (ОМ) Olympus GX 51 снабженного анализатором SIAMS 700. Диаметр ЛЯ и ширину ЗТВ измеряли в 3-х сечениях, после чего рассчитывали их среднее значение.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

На рисунке 7 и 8 представлены облучённые области покрытий на основе быстрорежущей стали. Видно, что они имеют как округлую, так и овальную форму, что связано с нормальным распределением энергии по сечению лазерного луча (Гауссово распределение) [1]. Облучённые области состоят из литого ядра (оплавленная зона) и зоны термического влияния, поверхность которых покрыта тёмной и светлой оксидной плёнкой. После оплавления на поверхности покрытия появляются волнистость, углубления и выплески металла. Образование волнистости на поверхности переплавленного покрытия связано неустойчивостью ванны расплава, которая вызывает возникновение капиллярных волн. Углубление в центре литого ядра и выплески возникают за счёт абляции материала в результате поглощения им удельной теплоты парообразования под действием лазерного излучения [1].

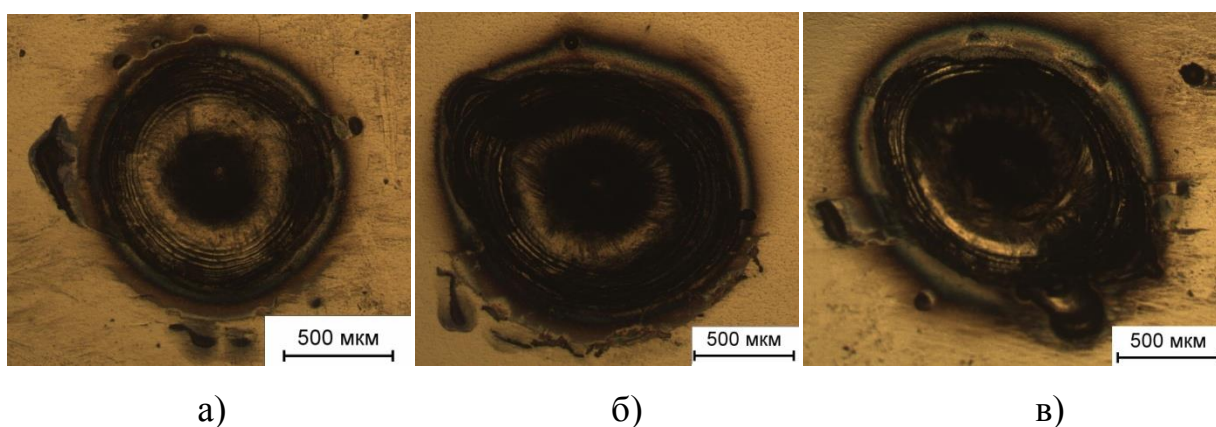


Рисунок 7 – внешний вид оплавленных зон покрытия на основе стали 10P6M5, а) – 10 мс, 110 А, б) – 10 мс, 150 А, в) – 15 мс, 120 А

Образование овальной формы ЛЯ в покрытии на основе стали 10P6M5 происходит при средних и больших значениях энергии лазерного излучения (свыше 20 Дж). При меньших значениях энергии форма зоны облучения преимущественно имеет округлый вид. В покрытии 10P6M5 + 20% WC ярко выраженная овальная форма ЛЯ наблюдается при малых значениях энергии облучения, рис. 8, а, г (меньше 10 Дж). При больших значениях энергии больше

проявляется округлая форма оплавленной зоны, рис. 8, б, в, однако овальность также присутствует.

После облучения композиционного покрытия 10P6M5 + 20% WC на поверхности ЛЯ образуются разветвлённые трещины, рисунок 8, которые проходят через ЗТВ, но не получают дальнейшего развития в материал наплавки.

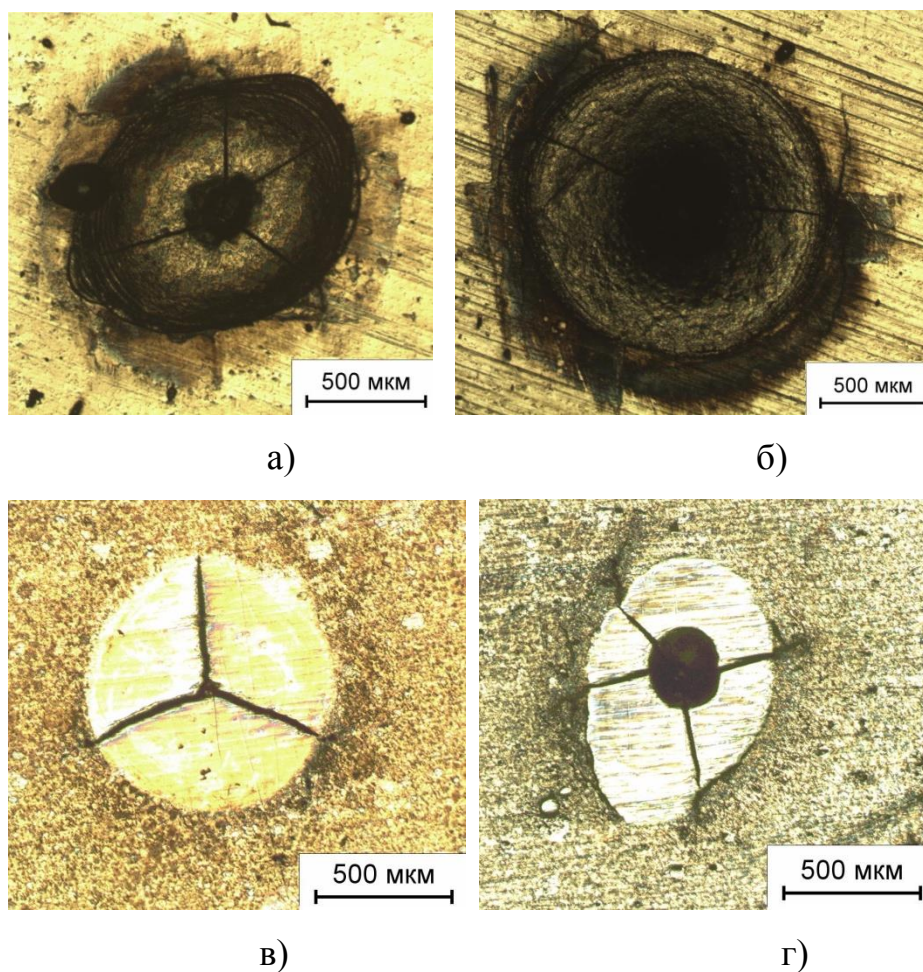


Рисунок 8 – внешний вид оплавленных зон покрытия на основе стали 10P6M5 + 20% WC, а) – 10 мс, 90 А, б) – 20 мс, 170 А, после шлифования, полирования и травления, в) – 10 мс, 110 А, г) – 15 мс, 80 А

Анализ поверхности облучения покрытий позволил выявить взаимосвязь между диаметром ЛЯ и энергией излучения, рис. 9 и рис. 10. Для покрытия 10P6M5 увеличение силы тока лазерного излучения от 100 до 140 А при длительности импульса 10, 15 и 20 мс приводит к возрастанию диаметра литого ядра от 850 до 1450 мкм. При дальнейшем увеличении энергии излучения

диаметр литого ядра не изменяется и равняется 1300 мкм для 10 мс, 1350 мкм для 15 мс и 1450 мкм для 20 мс.

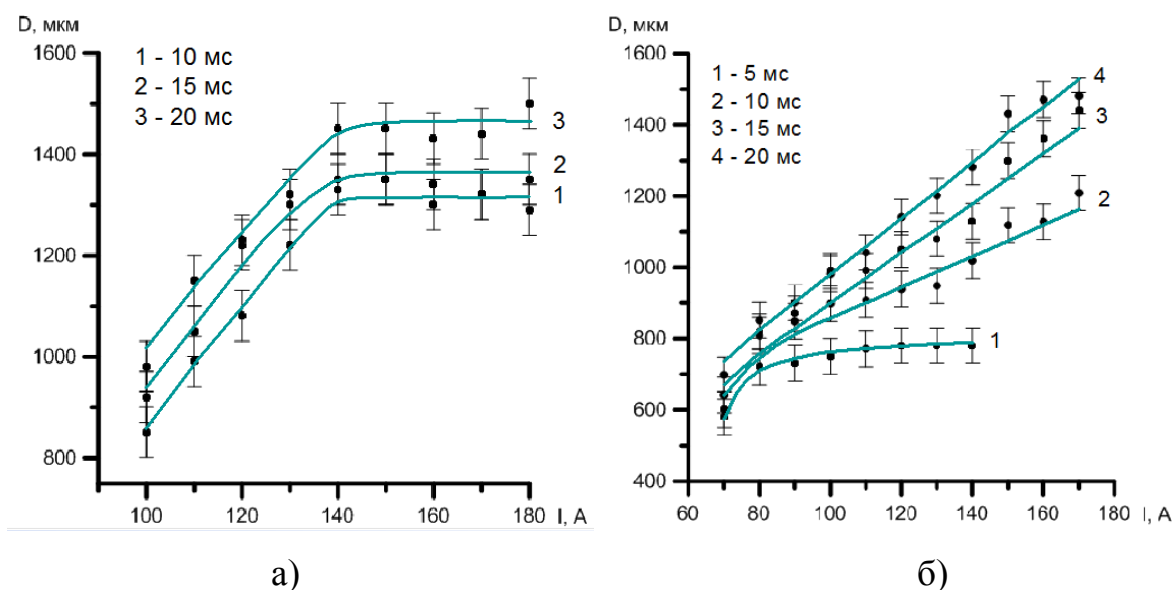


Рисунок 9 – зависимость диаметра ЛЯ от величины силы тока излучения для покрытия 10P6M5 – а), 10P6M5 + 20% WC – б)

Для покрытия 10P6M5 + 20% WC увеличение диаметра ЛЯ происходит пропорционально изменению силы тока излучения от 70 до 180 А. Максимальные и минимальные значения диаметра ЛЯ равняются: 600 и 780 мкм для 5 мс, 700 и 1200 мкм для 10 мс, 600 и 1400 мкм для 15 мс, 640 и 1440 мкм для 20 мс.

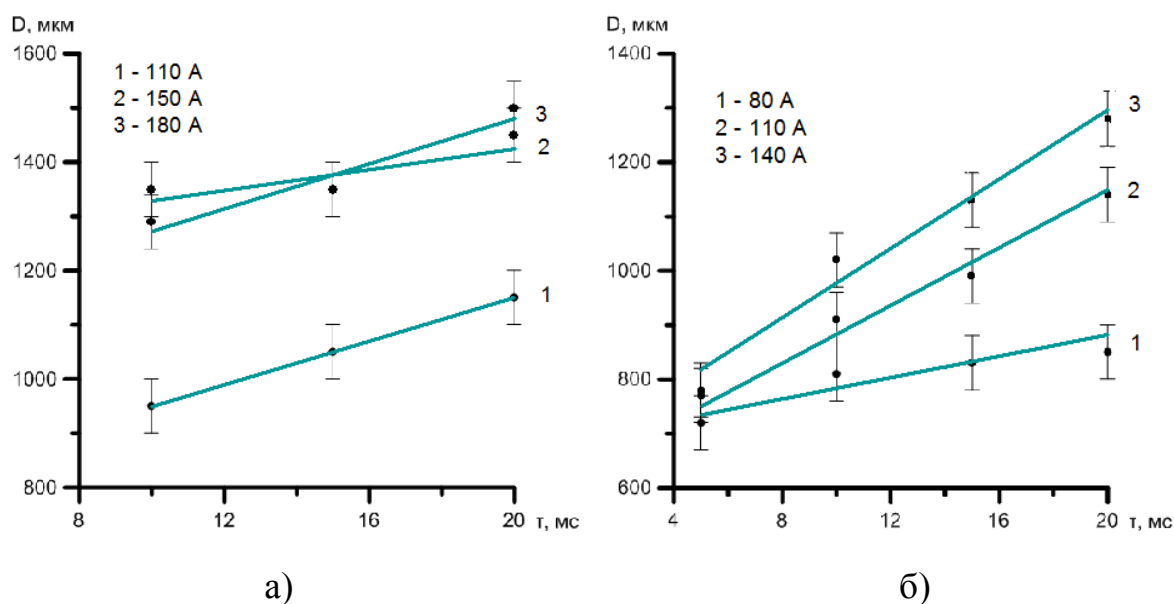


Рисунок 10 – зависимость диаметра ЛЯ от длительности импульса излучения для покрытия 10P6M5 – а), 10P6M5 + 20% WC – б)

Графики на рисунке 10 отображают влияние длительности импульса на изменение диаметра ЛЯ. Видно, что увеличение длительности лазерного импульса приводит к возрастанию диаметра литого ядра. Изменение величины ЗТВ от значения энергии излучения представлено на рисунке 11. Для обоих видов покрытия наблюдается тенденция роста ширины ЗТВ при увеличении значений силы тока излучения до 140 А включительно. Минимальные значения ширины ЗТВ для покрытия 10P6M5 равняются 130 мкм для 10 мс при 100 А, а максимальное – 260 мкм для 20 мс при 140-180 А. Минимальные значения ширины ЗТВ для покрытия 10P6M5 + 20% WC равняются 60 мкм для 5 мс при 70 А, а максимальное – 260 мкм для 20 мс при 140-180 А.

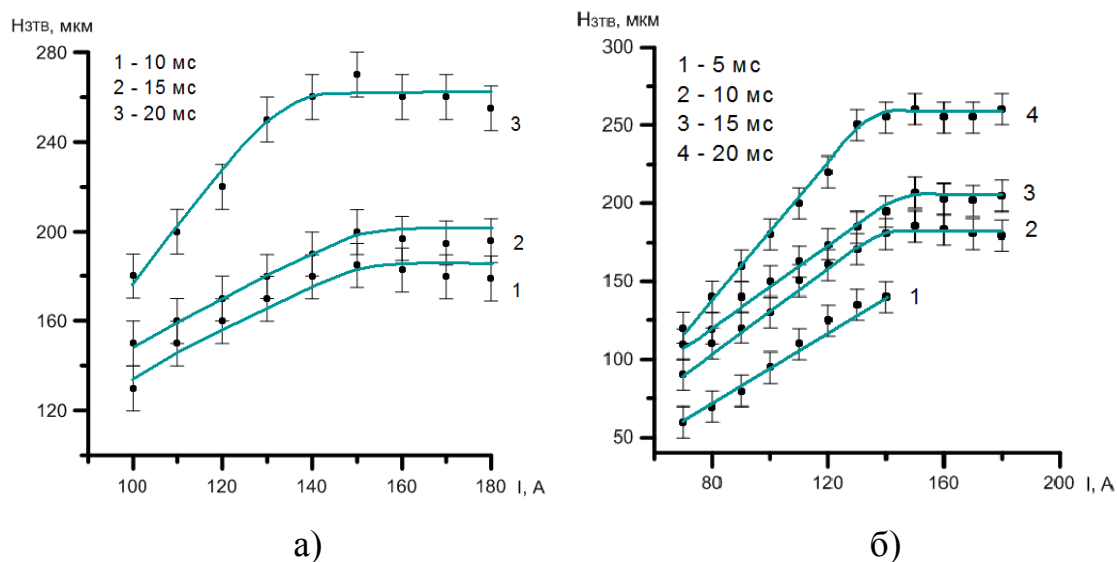


Рисунок 11 – зависимость ширины ЗТВ от величины силы тока излучения для покрытия 10P6M5 – а), 10P6M5 + 20% WC – б)

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

4.1. Предпроектный анализ

В настоящее время, вместе с развитием науки, бурно развиваются все отрасли промышленности. Всегда шла конкуренция между новыми технологиями и разработками, которые вытесняли с рынка устаревшую продукцию. Вытеснение старой технологии новой происходит тем быстрее, чем больше её надёжность и экономическая эффективность.

Всё, что нас окружает, создано из различных материалов, различающихся по своему строению, свойствам и ценой. Однако большинство из нас хочет иметь самое лучшее, что сможет себе позволить по доступной цене. Исключением не являются самые крупные и состоятельные компании мира, в том числе и промышленные предприятия. Ведь одним из самых главных секретов увеличения дохода является снижение затрат.

Потенциальные потребители результатов исследования.

Данное исследование содержит результаты поверхностной лазерной обработки покрытия на основе быстрорежущей стали 10P6M5. Результаты исследования целесообразно применить во все отрасли общего машиностроения для тяжело нагруженных пар трения.

Покрытие на основе стали 10P6M5 является наиболее износостойким композиционным материалом, который используется в условиях высоких нагрузок и скоростей.:

- Шейки шестерён валов высоко нагруженных редукторов;
- Промышленное оборудование в горнодобывающей, химической, криогенной промышленности;
- Судостроение, автомобилестроение и авиастроение.

В зависимости от области применения данного покрытия, от него требуются определённые прочностные характеристики, которые получают с помощью различных упрочняющих технологий.

Итак, целевой рынок результатов исследования будет включать в себя все отрасли промышленности, нуждающиеся в износостойких покрытиях. В исследовании рассматривается комбинированная обработка: электронно-лучевая наплавка покрытия на основе быстрорежущей стали + лазерной оплавление поверхности покрытия. Подобных технологий на сегодняшний день единицы, поэтому конкурентное производство отсутствует, и нет нужды в сегментировании целевого рынка.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

В качестве конкурентных упрочняющих технологий можно выделить: поверхностная закалка токами высокой частоты, дробеструйная обработка, термическая обработка. Однако если рассматривать покрытие на основе стали 10P6M5, то вышеперечисленные упрочняющие технологии нецелесообразны ввиду проявления возможного отрицательного эффекта на эксплуатационные характеристики покрытия.

Fast – анализ

В качестве предмета исследования выбран комплекс лазерной сварки ЛТА4-2, так как с помощью него производились основная часть экспериментальных работ.

4.2. Описание главных, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом

Таблица 4 – Классификация функций, выполняемых объектом

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
1.Каркас установки	1	Установка элементов комплекса		X	
2.Лазерный излучатель	1	Образует лазер	X		
3.Пульт управления	1	Управление процессом	X		
4.Монитор	1	Настройка параметров		X	
5.Пневмосистема	1	Подача газа		X	
6.Стойка питания и охлаждения лазера	1	Охлаждение			X
7.Блок коммутации и управления	1	Электропитание систем комплекса		X	
8.Блок управления двигателями	1	Электропитание приводов		X	
9. Блок питания лазера	1	Электропитание лазера	X		
10. Система охлаждения	1	Охлаждение	X		
11. Линейный привод	1	Линейное перемещение детали		X	
12. Вращательный привод	1	Вращение детали		X	

4.3. Определение значимости выполняемых функций объектом

Таблица 5 – Матрица смежности

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.Каркас установки	=	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
2.Лазерный излучатель	>	=	<	>	>	>	>	>	=	>	>	>
3.Пульт управления	>	>	=	>	>	>	>	>	>	>	>	>
4.Монитор	>	<	<	=	>	=	=	=	=	=	=	=
5.Пневмосистема	>	<	<	=	=	=	<	<	<	<	<	<
6.Стойка питания и охлаждения лазера	>	<	<	=	=	=	=	=	=	=	=	=
7.Блок коммутации и управления	>	<	<	=	>	=	=	=	=	=	=	=
8.Блок управления двигателями	>	<	<	=	>	=	=	=	<	=	=	=
9. Блок питания лазера	>	<	<	=	>	=	=	>	=	=	=	=
10. Система охлаждения	>	<	<	=	>	=	=	=	=	=	=	=
11. Линейный привод	>	<	<	=	>	=	=	=	=	=	=	=
12. Вращательный привод	>	<	<	=	>	=	=	=	=	=	=	=

Примечание: «<» – менее значимая; «=» – одинаковые функции по значимости; «>» – более значимая

Преобразовываем матрицы смежности в матрицы количественных соотношений функций.

Таблица 6 – матрица количественных соотношений функций

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Итого	Вес	
1.Каркас установки	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	6,5	0,042	
2.Лазерный излучатель	1,5	1	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1,5	1,5	1,5	16	0,1	
3.Пульт управления	1,5	1,5	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	17,5	0,11	
4.Монитор	1,5	0,5	0,5	1	1,5	1	1	1	1	1	1	1	12	0,077	
5.Пневмосистема	1,5	0,5	0,5	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	8,5	0,054	
6.Стойка питания и охлаждения лазера	1,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11,5	0,074	
7.Блок коммутации и управления	1,5	0,5	0,5	1	1,5	1	1	1	1	1	1	1	12	0,077	
8.Блок управления двигателями	1,5	0,5	0,5	1	1,5	1	1	1	0,5	1	1	1	11,5	0,074	
9. Блок питания лазера	1,5	0,5	0,5	1	1,5	1	1	1,5	1	1	1	1	12,5	0,08	
10. Система охлаждения	1,5	0,5	0,5	1	1,5	1	1	1	1	1	1	1	12	0,077	
11. Линейный привод	1,5	0,5	0,5	1	1,5	1	1	1	1	1	1	1	12	0,077	
12. Вращательный привод	1,5	0,5	0,5	1	1,5	1	1	1	1	1	1	1	12	0,077	
													Σ	156	1

Примечание: 0,5 при «<»; 1,5 при «>»; 1 при «=»

4.4. Определение значимости функций

Определяем значимость функций путем деления балла, полученного по каждой функции, на общую сумму баллов по всем функциям. Каркас установки $6,5/156=0,042$; Лазерный излучатель $16/156=0,1$; 5/50=0,1; Пульт управления $17,5/156=0,11$; Монитор $12/156=0,077$; Пневмосистема $8,5/156=0,054$; Стойка питания и охлаждения лазера $11,5/156=0,074$; Блок коммутации и управления $12/156=0,077$ Блок управления двигателями $11,5/156=0,074$; Блок питания лазера $12,5/156=0,08$; Система охлаждения $12/156=0,077$; Линейный привод $12/156=0,077$; Вращательный привод $12/156=0,077$.

4.5. Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Таблица 7 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Норма расхода, кг	Трудоемкость детали, нормо-часов	Стоимость материала, руб.	Заработная плата, руб.	Себестоимость, руб.	Итого, руб	Вес
1.Каркас установки	1	Установка элементов комплекса	20	5	6 000	1 000	3 000	10 000	0,075
2.Лазерный излучатель	1	Образует лазер	1	2	9 000	2 000	4 000	15 000	0,112
3.Пульт управления	1	Управление процессом	30	5	10 000	2 000	4 000	16 000	0,119
4.Монитор	1	Настройка параметров	2	3	2 000	500	1 000	3 500	0,026
5.Пневмосистема	1	Подача газа	5	4	5 000	1 000	2 000	8 000	0,06
6.Стойка питания и охлаждения лазера	1	Охлаждение	5	2	3 000	800	1 500	5 300	0,04
7.Блок коммутации и управления	1	Электропитание систем комплекса	5	3	6 000	1 500	2 500	10 000	0,075
8.Блок управления двигателями	1	Электропитание приводов	5	3	6 000	1 200	2 000	9 200	0,069
9. Блок питания лазера	1	Электропитание лазера	5	4	7 000	1 800	3 000	11 800	0,088
10. Система охлаждения	1	Охлаждение	8	5	12 000	3 000	4 000	19 000	0,142

11. Линейный привод	1	Линейное перемещение детали	5	5	8 000	2 000	3 000	13 000	0,097
12. Вращательный привод	1	Вращение детали	5	5	7 000	2 000	4 000	13 000	0,097
							Σ	133 0	1

4.6. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ

Информация об объекте исследования, собранная в рамках предыдущих стадий, на данном этапе обобщается в виде функционально – стоимостной диаграммы (ФСД), рис. 12 .

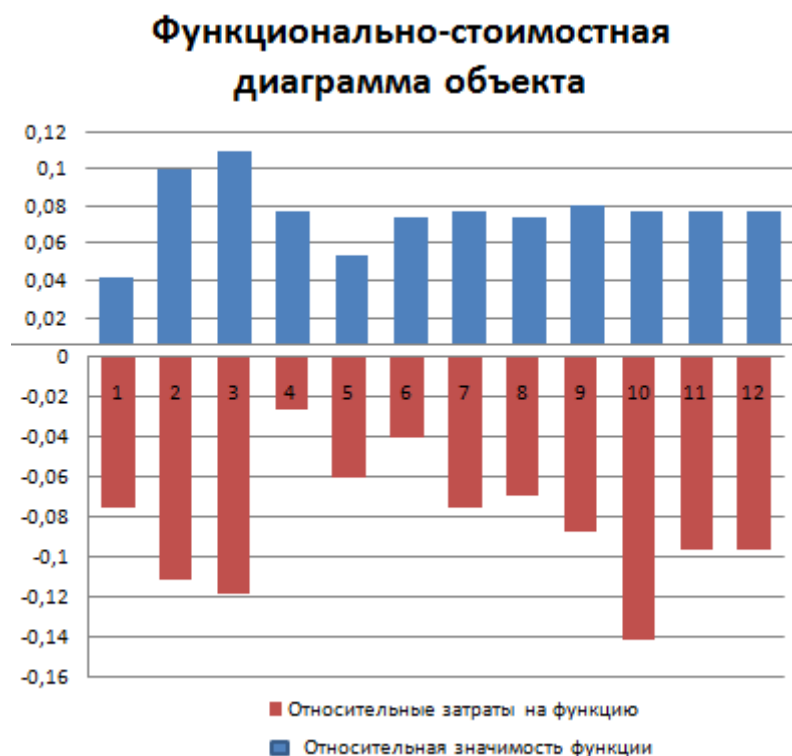


Рисунок 12 – функционально-стоимостная диаграмма

Анализ, приведенный выше ФСД показывает явное наличие рассогласования по функции 1, 4, 10 к которым относятся каркас установки, монитор и система охлаждения. Необходимо провести работы по ликвидации данных диспропорций.

4.7. Оптимизация функций выполняемых объектом

В качестве оптимизации данных функций можно выделить следующее:

- 1) применения принципиально новых конструкторских решений;

- 2) унификации сборочных единиц и деталей;
- 3) использование новых заготовок и материалов;
- 4) оптимизация параметров надежности.

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Характеристика объекта исследования

В ходе научного исследования ставились эксперименты на комплексе лазерной сварки «ЛТА4-2», а также множество работы было проделано с использованием ЭВМ.

При проведении экспериментов работники подвергались в основном вредному воздействию электромагнитных излучений и полей, а также воздействию и других вредных факторов, образующихся в результате взаимодействия электромагнитного излучения с предметами окружающей среды. Электромагнитное излучение, образующееся при работе лазерного комплекса относится к видимому, ультрафиолетовому и инфракрасному спектру излучения.

5.1. Производственная безопасность

5.1.1. Анализ выявленных вредных факторов

В зависимости от типа, конструкции и целевого назначения лазеров и лазерных установок на обслуживающий персонал могут воздействовать следующие опасные и вредные факторы:

- лазерное излучение (прямое, отраженное и рассеянное);
- сопутствующие ультрафиолетовое, видимое и инфракрасное излучения от источников накачки, плазменного факела и материалов мишени;
- высокое напряжение в цепях управления и источниках электропитания;
- электромагнитное излучение промышленной частоты и радиочастотного диапазона;
- рентгеновское излучение от газоразрядных трубок и других элементов, работающих при анодном напряжении более 5 кВ;
- шум;
- вибрация;

- токсические газы и пары от лазерных систем с прокачкой, хладагентов и др.;
- продукты взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемыми материалами;
- повышенная температура поверхностей лазерного изделия;
- опасность взрыва в системах накачки лазеров.

При эксплуатации и разработке лазерных изделий необходимо учитывать также возможность взрывов и пожаров при попадании лазерного излучения на горючие материалы.

Лазеры являются устройствами, представляющими повышенную опасность. Хотя существуют несколько факторов риска, связанных с лазерными установками, под лазерной безопасностью понимают способы защиты от факторов, связанных непосредственно с лазерным излучением.

Лазеры, излучающие вне видимого диапазона, представляют особую опасность в связи с тем, что человеческий глаз неспособен определить местоположение луча. При попадании в глаз такой луч будет замечен лишь тогда, когда поражение глаза уже наступило. Однако лазеры с достаточно большой длиной волны излучения (1,5 мкм) не проходят через внешние оболочки глаза и при малой мощности опасности не представляют. В этом случае поражение глаз возможно только при мощности, достаточной для разрушения роговицы глаза. Также многие виды излучения свободно проходят препятствия из оптически непрозрачных материалов (излучение на частотах 1-50ТГц проходит через лавсановую пластинку, в то время как для оптического и ИК излучения она является непрозрачной).

Даже лазеры самой малой мощности (несколько милливатт) могут представлять опасность для зрения. При попадании в глаз луч лазера фокусируется в пятно очень малых размеров, что может за доли секунды привести к ожогам сетчатки глаза, частичной или полной необратимой потере зрения. Лазеры большей мощности способны вызывать поражения глаз даже рассеянным излучением. Прямое, а в некоторых случаях и

рассеянное излучение такого лазера способно вызывать ожоги кожи (вплоть до полного разрушения) и представляет пожарную опасность.

По степени опасности генерируемого излучения для обслуживающего персонала лазеры подразделяются на четыре класса:

- **Класс 1.** Лазерные изделия безопасные при предполагаемых условиях эксплуатации (выходное излучение не опасно для глаз).
- **Класс 2.** Лазерные изделия, генерирующие видимое излучение в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм. Защита глаз обеспечивается естественными реакциями, включая рефлекс мигания.
- **Класс 3.** Опасно для глаз прямое, зеркальное, а также диффузно отраженное излучение на расстоянии 10 см от отражающей поверхности и (или) для кожи прямое или зеркально отраженное излучение. **Класс 3А.** Лазерные изделия безопасные для наблюдения незащищенным глазом. Для лазерных изделий, генерирующих излучение в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм, защита обеспечивается естественными реакциями, включая рефлекс мигания. Для других длин волн опасность для незащищенного глаза не больше чем для класса 1. Непосредственное наблюдение пучка, испускаемого лазерными изделиями класса 3А с помощью оптических инструментов (например, бинокль, телескоп, микроскоп), может быть опасным. **Класс 3В.** Непосредственно наблюдение таких лазерных изделий всегда опасно. Видимое рассеянное излучение обычно безопасно.

Примечание - Условия безопасного наблюдения диффузного отражения для лазерных изделий класса 3В в видимой области: минимальное расстояние для наблюдения между глазом и экраном - 13 см, максимальное время наблюдения - 10 с.

- **Класс 4.** Лазерные изделия, создающие опасное рассеянное излучение. Они могут вызвать поражение кожи, а также создать опасность пожара. При их использовании следует соблюдать особую осторожность.

Эта градация определена ГОСТ Р 50723-94 «Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий».

В качестве ведущих критериев при оценке степени опасности генерируемого лазерного излучения приняты величина мощности (энергии), длина волны, длительность импульса и экспозиция облучения.

Предельно допустимые уровни, требования к устройству, размещению и безопасной эксплуатации лазеров регламентированы «Санитарными нормами и правилами устройства и эксплуатации лазеров» № 2392-81, которые позволяют разрабатывать мероприятия по обеспечению безопасных условий труда при работе с лазерами. Санитарные нормы и правила позволяют определить величины ПДУ для каждого режима работы, участка оптического диапазона по специальным формулам и таблицам. Нормируется энергетическая экспозиция облучаемых тканей. Для лазерного излучения видимой области спектра для глаз учитывается также и угловой размер источника излучения.

Предельно допустимые уровни облучения дифференцированы с учетом режима работы лазеров:

- непрерывный режим,
- моноимпульсный,
- импульсно-периодический.

Основными нормативными правовыми актами при оценке условий труда с оптическими квантовыми генераторами являются:

1. «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров» № 2392-81;
2. Методические рекомендации «Гигиена труда при работе с лазерами», утвержденные МЗ РСФСР 27.04.81 г.;
3. ГОСТ 24713-81 «Методы измерений параметров лазерного излучения»;

4. Классификация: ГОСТ 24714-81 «Лазеры. Методы измерения параметров излучения»;

5. Общие положения: ГОСТ 12.1.040-83 «Лазерная безопасность. Общие положения»;

6. ГОСТ 12.1.031-81 «Лазеры. Методы дозиметрического контроля лазерного излучения».

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

При использовании лазеров 2-3 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.

Лазеры 4 класса опасности размещаются в отдельных изолированных помещениях и обеспечиваются дистанционным управлением их работой.

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.

Шумы и вибрации.

Защита от шума. Эксплуатация современного промышленного оборудования и средств транспорта сопровождается значительным уровнем шума и вибрации, негативно влияющих на состояние здоровья работающих. С точки зрения безопасности труда шум и вибрация — одни из наиболее распространенных вредных производственных факторов на производстве, которые при определенных условиях могут выступать как опасные производственные факторы.

Шум — это сочетание звуков различной частоты и интенсивности. С физиологической точки зрения шумом называют любой нежелательный звук, оказывающий вредное воздействие на организм человека.

Борьба с шумом осуществляется различными методами и средствами:

- снижение мощности звукового излучения машин и агрегатов;
- локализация действия звука конструктивными и планировочными решениями;
- организационно-техническими мероприятиями;
- лечебно-профилактическими мерами;
- применением средств индивидуальной защиты работающих.

На производстве снижение шума на пути его распространения достигается путем проведения строительно-акустических мероприятий. Для этого устанавливают кожухи, экраны, звукоизолирующие перегородки между помещениями, звукопоглощающие облицовки, глушители шума. Под акустической обработкой помещений понимается облицовка части внутренних поверхностей ограждений звукопоглощающими материалами, а также размещения в помещениях штучных поглотителей.

При встрече звуковой энергии с ограждением часть её проходит через ограждение, часть её отражается, часть - превращается в тепловую энергию, часть - излучается колеблющейся преградой, и часть - превращается в корпусной звук, распространяющийся внутри ограждения в помещении.

Звукоизолирующие качество ограждения характеризуются коэффициентом звукопроницаемости τ :

$$\tau = \frac{I_{np}}{I_{пад}} = \frac{P_{np}^2}{P_{пад}^2},$$

где I_{np} , P_{np} – интенсивность и звуковое давление прошедшего звука;

$I_{пад}$, $P_{пад}$ – интенсивность и звуковое давление падающего звука.

Звукоизолирующая способность конструкции тем выше, чем выше ее поверхностная плотность. Эффективными звукоизолирующими материалами являются: бетон, дерево, плотные пластмассы и др. Звукоизоляция является одним из наиболее эффективных и распространенных методов снижения производственного шума на пути его распространения. С помощью звукоизолирующих преград можно снизить уровень шума на 30-40 дБ.

Защита от вибрации. Вибрация может быть причиной функциональных расстройств нервной и сердечно - сосудистой систем, а также опорно-двигательного аппарата.

В соответствии с ГОСТ 24346-80 (СТСЭВ 1926-79) под вибрацией понимается движение точки или механической системы, при которой происходит поочередное возрастание и убывание во времени значений, по крайней мере, одной координаты.

Принято различать общую и локальную вибрацию. Общая вибрация действует на весь организм человека через опорные поверхности - сиденье, пол; локальная вибрация оказывает действие на отдельные части тела.

Виброизоляция заключается в уменьшении передачи колебаний от источника к защищаемому объекту при помощи устройств, помещаемых

между ними. Для виброизоляции чаще всего применяют виброизолирующие опоры типа упругих прокладок, пружин или их сочетания.

Профилактические меры по защите от вибраций заключаются в уменьшении их в источнике образования и на пути распространения, а также в применении индивидуальных средств защиты, проведении санитарных и организационных мероприятий.

Уменьшения вибрации в источнике возникновения достигают изменением технологического процесса с изготовлением деталей из капрона, резины, текстолита, своевременным проведением профилактических мероприятий и смазочных операций; центрированием и балансировкой деталей; уменьшением зазоров в сочленениях. Передачу колебаний на основание агрегата или конструкцию здания ослабляют посредством экранирования, что является одновременно средством борьбы и с шумом.

Если методы коллективной защиты не дают результата или их нерационально применять, то используют средства индивидуальной защиты. В качестве средств защиты от вибрации при работе с механизированным инструментом применяют антивибрационные рукавицы и специальную обувь. Антивибрационные полусапоги имеют многослойную резиновую подошву.

Длительность работы с вибрирующим инструментом не должна превышать $\frac{2}{3}$ рабочей смены. Операции распределяют между работниками так, чтобы продолжительность непрерывного действия вибрации, включая микропаузы, не превышала 15...20 мин. Рекомендуются делать перерывы на 20 мин через 1...2 ч после начала смены и на 30 мин через 2 ч после обеда.

Защита от электромагнитного излучения.

В технических средствах защиты используют явления отражения и поглощения энергии излучателя, применяя различные виды экранов и поглотителей мощности. Благодаря высоким коэффициентам поглощения и почти полному отсутствию волнового сопротивления металлы обладают

высокой отражательной и поглощающей способностью и поэтому широко применяются для экранирования.

Защита от СВЧ излучений кроме экранирования самих источников может быть обеспечена поглощающими нагрузками, экранированием рабочих мест и применением индивидуальных средств защиты. Экраны могут быть снабжены поглощающими или интерференционными покрытиями, для улучшения условий поглощения, т.к. в поглощающих покрытиях электромагнитная энергия рассеивается в виде тепловых потерь (материалы для поглощающих покрытий — каучук, пенополистирол, полиуретан и т.п.).

Для защиты глаз используют специальные радиозащитные очки из стекла, отражающего электромагнитные излучения.

Для защиты тела — капюшоны, халат и комбинезоны, выполненные из металлизированной хлопчатобумажной ткани.

5.1.2. Анализ выявленных опасных факторов

Микроклимат в производственных помещениях

В процессе труда в производственном помещении человек находится под влиянием определенных метеорологических условий, или микроклимата — климата внутренней среды этих помещений. К основным нормируемым показателям микроклимата воздуха рабочей зоны относятся температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Существенное влияние на параметры микроклимата и состояние человеческого организма оказывает также интенсивность теплового излучения различных нагретых поверхностей, температура которых превышает температуру в производственном помещении.

Влияние температуры окружающего воздуха на человеческий организм связано в первую очередь с сужением или расширением кровеносных сосудов кожи. Под действием низких температур воздуха

кровеносные сосуды кожи сужаются, в результате чего замедляется поток крови к поверхности тела и снижается теплоотдача от поверхности тела за счет конвекции и излучения. При высоких температурах окружающего воздуха наблюдается обратная картина: за счет расширения кровеносных сосудов кожи и увеличения притока крови существенно увеличивается теплоотдача в окружающую среду.

Повышенная влажность ($>85\%$) затрудняет теплообмен между организмом человека и внешней средой вследствие уменьшения испарения влаги с поверхности кожи, а низкая влажность ($<20\%$) приводит к пересыханию слизистых оболочек дыхательных путей. Движение воздуха в производственном помещении улучшает теплообмен между телом человека и внешней средой, но излишняя скорость движения воздуха (сквозняки) повышает вероятность возникновения простудных заболеваний.

Постоянное отклонение от нормальных параметров микроклимата приводит к перегреву или переохлаждению человеческого организма и связанным с ними негативным последствиям: при перегреве — к обильному потоотделению, учащению пульса и дыхания, резкой слабости, головокружению, появлению судорог, а в тяжелых случаях — возникновению теплового удара. При переохлаждении возникают простудные заболевания, хронические воспаления суставов, мышц и др.

Для исключения перечисленных выше негативных последствий необходимо правильно выбирать параметры микроклимата в производственных помещениях.

В отечественных нормативных документах введены понятия оптимальных и допустимых параметров микроклимата. Оптимальными микроклиматическими условиями являются такие сочетания количественных параметров микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают сохранение нормального функционального и теплового состояния организма без напряжения

механизмов терморегуляции. Они обеспечивают ощущение теплового комфорта и создают предпосылки для высокого уровня работоспособности.

Допустимыми условиями являются такие сочетания количественных параметров микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека могут вызвать преходящие и быстро нормализующиеся изменения функционального и теплового состояния организма, сопровождающиеся напряжением механизмов терморегуляции, не выходящим за пределы физиологических приспособительных возможностей. При этом не возникает повреждений или нарушений состояния здоровья, но могут наблюдаться ухудшение самочувствия и снижение работоспособности.

Для создания требуемых параметров микроклимата в производственном помещении применяют системы вентиляции и кондиционирования воздуха, а также различные отопительные устройства. Вентиляция представляет собой смену воздуха в помещении, предназначенную поддерживать в нем соответствующие метеорологические условия и чистоту воздушной среды.

Вентиляция помещений достигается удалением из них нагретого или загрязненного воздуха и подачей чистого наружного воздуха.

Для эффективной работы системы общеобменной вентиляции при поддержании требуемых параметров микроклимата количество воздуха, поступающего в помещение, должно быть практически равно количеству воздуха, удаляемого из него.

При отклонении параметров микроклимата от величин, создающих комфортные условия, большое значение имеет правильный выбор спецодежды. При работе в помещениях с пониженной температурой воздуха необходимо использовать утепленную спецодежду. Для персонала, занятого в горячих цехах, используют спецодежду, изготовленную из материалов с низкой теплопроводностью.

Защита от вредных веществ

Для уменьшения содержания вредных веществ в воздухе рабочей зоны применяют следующие мероприятия:

- Механизация и автоматизация производственных процессов, дистанционное управление ими.
- Применение технологических процессов и оборудования, исключающих образование вредных веществ или попадание их в рабочую зону. Для уменьшения попадания вредных веществ в рабочую зону большое значение имеет герметизация оборудования.
- Устройство вентиляции.
- Применение средств индивидуальной защиты.

Самым распространенным средством снижения содержания вредных веществ в воздухе рабочей зоны является вентиляция. Вентиляция представляет собой организованный и регулируемый воздухообмен, обеспечивающий удаление из помещения воздуха, загрязненного вредными газами, а также улучшающий микроклиматические условия в производственных помещениях.

Защита от теплового излучения

Тепловым излучением называется процесс, при котором теплота излучения распространяется в основном в форме инфракрасного излучения с длиной волны около 10 мкм. Источниками тепловых излучений являются все тела, нагретые до температуры выше температуры окружающей среды. В условиях производства источниками тепловых излучений могут быть наружные стенки котлов и горячих трубопроводов, технологическое оборудование, провода и кабели электросетей, электрические машины и аппараты и др. Расплавленные и раскаленные металлы являются источниками инфракрасных излучений.

Температура нагретых поверхностей производственного оборудования и ограждений на рабочих местах (печей, ванн и др.) не должна превышать 45 °С, а для оборудования, внутри которого температура равна или ниже 100 °С, температура на поверхности не должна превышать 35 °С.

Для защиты людей от вредного воздействия теплового излучения и высоких температур применяют теплоизоляцию горячих поверхностей, например путем обмазки наружных поверхностей котлов и трубопроводов горячей воды каким-либо строительным раствором с наполнителем в виде стекловаты или асбеста. Общей защитой от излучения могут служить экраны из малотеплопроводных материалов (асбест, шифер), а в качестве средств индивидуальной защиты применяются спецодежда (брезентовые или суконные костюмы), очки со светофильтрами, щитки из органического стекла и др.

В горячих цехах существенную роль играет снабжение рабочих питьевой подсоленной или газированной водой, употребление которой улучшает водный баланс организма.

Гигиеническая оценка

Таблица 8 - интегральная оценка тяжести труда.

№	Фактор рабочей среды и условий труда	Значения показателя фактора (X_i)	Бальная оценка	Фактическая продолжительность действия фактора, мин	Оценка тяжести рабочей среды
	Средняя температура воздуха на рабочем месте, °С:	20°С	1	480	1
	Вредные вещества, кратность превышения ПДК	1,0	2	240	2

	Тепловое излучение, Вт/см ²	0,035	3	420	3
	Промышленная пыль, кратность превышения ПДК раз	-	1	480	1
	Ультразвук в воздухе, ПДУ плюс превышение, дБ	ПДУ	2	420	2
	Электромагнитное излучение ВЧ - и СВЧ	ПДУ	2	480	2
	Промышленный шум, превышение ПДУ, дБ	83 дБ	2	420	2
	Вибрация, кратность превышения ПДУ	ПДУ	2	420	2
	Рабочее место (РМ), поза и перемещение в пространстве	2	1	480	1
	Сменность	1	1	240	1
	Длительность сосредоточенного наблюдения, %	>50	2	420	2
	Число важных объектов наблюдения	5	1	420	1
	Напряжение памяти: необходимость помнить об элементах работы свыше двух часов	1	1	420	1

	Нервно-эмоциональная нагрузка	0,5	1	420	1
--	-------------------------------	-----	---	-----	---

$$T = [X_{\max} + ((6-X_{\max})/6 \cdot (N-1)) \cdot \sum X_i]$$

$$T = [3 + ((6-3)/6 \cdot (14-1)) \cdot (1+2+3+1+2+2+2+2+1+1+2+1+1+1)] \approx 3,85$$

Исходя из полученного значения интегральной оценки, определяем, что категория тяжести труда в данном рабочем помещении соответствует III.

К третьей категории тяжести относятся работы, при выполнении которых в организме человека из-за повышенной нагрузки или не вполне благоприятных условий труда формируется начальная стадия пограничного функционального состояния. Основным признаком третьей категории тяжести является замедление физиологических функций. Замедляется выполнение обычных рабочих операций (заданий), снижается индивидуальная производительность труда.

5.2. Экологическая безопасность

Согласно документации приведённой в п. 5.1.2. комплекс мероприятий по радиационной безопасности (при работе открытых источников излучения) должен обеспечить защиту окружающей среды - воздуха, почвы, растительности и др. при нормальной эксплуатации и при проведении ремонтных работ и при ликвидации последствий радиационной аварии.

Выбор земельного участка для размещения установок, предназначенных для работы с источниками ионизирующих излучений необходимо согласовывать с органами Госнадзора. В жилых зданиях и детских учреждениях запрещается установка оборудования такого типа. Выбранное место (площадка) для размещения сооружения, предназначенного для работы с источниками ионизирующих излучений, должны

соответствовать требованиям «Санитарных норм проектирования промышленных предприятий СанПиН 2.2.1/2.1.1.567-96». Учреждения, предназначенных для работы с открытыми источниками ионизирующего излучения, должны располагаться с подветренной стороны относительно жилых зданий, общественных учреждений, зон отдыха, спортивных сооружений.

По периметру такого учреждения необходимо устанавливать санитарно-защитную зону и зону наблюдения. Их габариты определяются на основании расчета дозы внешнего излучения и распространения радиоактивных выбросов в атмосферу, сбросов в водоемы с учетом используемой системы очистки выбросов в атмосферу, благополучного увеличения мощности производства, а также гидрологических, экологических и метеорологических факторов. Размеры зон наблюдения при нормальной работе учреждения обычно в 3 - 4 раза больше размеров санитарно-защитной зоны. В санитарно-защитной зоне категорически запрещается построение жилых зданий, детских учреждений, больниц, санаториев и других спортивно-оздоровительных сооружений.

При проектировании рассматриваемых сооружений, дополнительно к мероприятиям по защите от внешнего излучения необходимо предусматривать меры по защите персонала и населения от внутреннего облучения и охране окружающей среды от радиоактивных загрязнений, при этом суммарная доза от внешних и внутренних источников излучений не должна превышать допустимого уровня, который установлен НРБ-99/2009.

5.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Комплекс лазерной сварки очень сложная система, которая отличается повышенной пожарной опасностью. В ходе работы установки есть вероятность выхода из строя системы охлаждения, что может привести к

пожару и даже взрыву, впоследствии которого произойдёт внешнее и внутреннее облучение.

Необходимо рассмотреть меры предупреждения и ликвидации последствий аварий (согласно ОСП-72/87 и НРБ-99/2009):

- прогнозирование аварийных ситуаций (пожар);
- порядок информирования вышестоящих организаций при возникновении аварийной ситуации;
- разработка мероприятий по ликвидации ЧС;
- правила поведения персонала при аварии;
- лечебно-профилактические мероприятия при внешнем и внутреннем облучении при аварии;
- ликвидация последствий аварии и защита персонала.

Ответственность за проведение мер по ликвидации последствий аварии несёт администрация учреждения, в котором произошла авария. Ускорители должны быть оборудованы автоматами, которые отключают питание сети при возникновении пожара или взрыва. Также необходимым условием для ускорителей II группы является наличие автоматического и ручного устройства для его отключения при отказе резервной вентиляции. В конструкции такого ускорителя необходимо предусмотреть на проектировочной стадии способы очистки воды, предназначенной для охлаждения его отдельных узлов.

Персонал, отвечающий за проведение ремонтных работ и работ, связанных с устранением последствий аварии должен быть обеспечен средствами индивидуальной защиты кожных покровов и органов дыхания.

В технической документации ускорителя должна содержаться информация о конструкционных материалах, подвергающихся активации в процессе облучения. При обнаружении дефектов в радиационной защите ускорителя следует немедленно отключить его от питания.

Пожарная безопасность.

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

Возникновение пожара в кабинете может быть обусловлено следующими факторами: в современных ПК очень высокая плотность размещения электронных схем. При протекании по ним электрического тока выделяется значительное количество тепла, что может привести к повышению температуры отдельных узлов до 100 °С. При этом возможно оплавление изоляции соединительных проводов, их оголение, как следствие - короткое замыкание, сопровождаемое искрением.

Следовательно, для целей обеспечения пожарной безопасности эксплуатация ПК связана с необходимостью проведения обслуживающих, ремонтных и профилактических работ. При этом используются различные смазочные материалы, легковоспламеняющиеся жидкости, прокладывают временные электропроводки, ведут пайку и чистку отдельных узлов и деталей. Также всегда есть вероятность дополнительной пожарной опасности, которая требует соответствующих мер пожарной профилактики.

Пожарная профилактика – комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращение пожара, ограничение его распространения, а также на создание условий для успешного тушения пожара. Успех борьбы с пожаром во многом зависит от его своевременного обнаружения и быстрого принятия мер по его ограничению и ликвидации.

Исходя из установленной номенклатуры обозначений зданий по степени пожарной опасности, анализируемое в данной работе помещение относится в категории.

Среди организационных и технических мероприятий, осуществляемых для устранения возможности пожара, выделяют следующие меры:

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

В кабинете должны висеть огнетушители, а также силовой щит, который позволяет мгновенно обесточить его. На видном месте в коридорах вывешены инструкции и обязанности сотрудников и план эвакуации в случае пожара. В случаях, когда не удастся ликвидировать пожар самостоятельно, необходимо вызвать пожарную охрану и покинуть помещение, руководствуясь разработанным и вывешенным планом эвакуации.

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Помещения должны иметь естественное и искусственное освещение. Расположение рабочих мест за мониторами и другими приборами для взрослых пользователей в подвальных помещениях не допускается.

Площадь на одно рабочее место с компьютером и другими приборами для взрослых пользователей должна составлять не менее 6 м², а объем не менее -20 м³.

Помещения с компьютерами должны оборудоваться системами отопления, кондиционирования воздуха или эффективной приточно-вытяжной вентиляцией.

Для внутренней отделки интерьера помещений с компьютерами и другими световыми приборами должны использоваться диффузно-отражающие материалы с коэффициентом отражения для потолка — 0,7-0,8; для стен — 0,5-0,6; для пола — 0,3-0,5.

Поверхность пола в помещениях эксплуатации компьютеров и других световых приборов должна быть ровной, без выбоин, нескользкой, удобной для очистки и влажной уборки, обладать антистатическими свойствами. В помещении должны находиться аптечка первой медицинской помощи.

Заключение

1. В результате лазерного оплавления покрытий на основе быстрорежущей стали форма ЛЯ принимает как округлый, так и овальный вид. Причём для покрытия 10P6M5 округлая форма облучённой зоны наблюдается при малых значениях энергии излучения, а овальная – при средних и больших (свыше 20 Дж). В покрытии сталь 10P6M5 + 20% WC овальная форма оплавленной зоны наблюдается при малых значениях энергии излучения (10 Дж), при больших значениях энергии в большей степени проявляется округлая форма ЛЯ.
2. Диаметр ЛЯ увеличивается с ростом силы тока излучения и длительности импульса. Для покрытия 10P6M5 рост диаметра ЛЯ наблюдается от 850 до 1450 мкм при увеличении силы тока излучения от 100 до 140 А. При дальнейшем увеличении силы тока до 180 А роста диаметра ЛЯ не наблюдается. В покрытии 10P6M5 + 20% WC диаметра ЛЯ возрастает от 600 до 1440 мкм пропорционально увеличению силы тока излучения от 70 до 180 А.
3. Ширина ЗТВ возрастает от 60 до 260 мкм при увеличении силы тока излучения от 70 до 140 А. При дальнейшем увеличении силы тока излучения рост величины ЗТВ не наблюдается.
4. Для лазерного комплекса ЛТА4-2 был проведён FAST – анализ и построена функционально-стоимостная диаграмма. Выявлены явные расхождения между функциональными и стоимостными показателями таких элементов конструкции комплекса, как каркас установки, монитор и система охлаждения.
5. Проведён анализ вредных и опасных факторов при работе с лазерным излучением. Определено, что выполнение работ на лазерной установке ЛТА4-2 относится к третьей категории тяжести труда. Рассмотрены меры защиты от влияния лазерного излучения и вредных веществ на организм

человека, а также основные меры безопасности при чрезвычайных ситуациях.

Список используемых источников:

1. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. - 304 с.
2. Бровер А. В. Комплекс механизмов упрочнения металлических материалов при импульсной лазерной обработке // Перспективные материалы, 2008. № 1. С. 63-69.
3. Огин П. А. Структура и свойства зон перекрытия при лазерной закалке сталей и чугунов // Вектор науки ТГУ. 2015. № 2. С. 130-135.
4. Дощечкина И. В. Условия лазерной обработки для получения максимально твёрдой поверхности среднеуглеродистых сталей // Вестник ХНАДУ. 2008. № 42. С 45-56.
5. Тимакова Е. А., Чкалов Л. А. Шестернин И. М. Способ лазерной обработки поверхности катания и гребня железнодорожных колёсных пар / Патент РФ № 2389805 С1 от 21.11.2008.
6. Тарасова Т. В., Кузьмин С. Д., Белоконь И. С. Влияние степени дискретного упрочнения поверхности на триботехнические характеристики сталей и сплавов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2015. Том 3, №1, С. 13-16.
7. Zheng-yang Li , Xu-hui Xing, Ming-jiang Yang. Investigation on rolling sliding wear behavior of wheel steel by laser dispersed treatment // Wear314 (2014) P. 236–240.
8. D. Felgueroso, R. Vijande, J.M. Cuetos. Parallel laser melted tracks: Effects on the wear behaviour of plasma-sprayed Ni-based coatings // Wear 264 (2008) P. 257–263.
9. Zhihui Zhang, Pengyu Lin, Shuhua Kong. Thermal fatigue behavior of Mg–9Al–Zn alloy with biomimetic strengthening units processed by laser surface remelting // Optics & Laser Technology70 (2015) P. 1–6.

10. Костюк Г. И., Руденко Н. В. Лазерное упрочнение легированных сталей //Авиационно-космическая техника и технология. 2012, № 2. С. 27.
11. Hyungson Ki, Sangwoo So, Sanseo Kim. Laser transformation hardening of carbon steel sheets using a heat sink // Journal of Materials Processing Technology 214 (2014) P. 2693–2705.
12. M. Pellizzari, M.G. De Flora. Influence of laser hardening on the tribological properties of forged steel for hot rolls // Wear 271 (2011) P. 2402– 2411.
13. You Lv. Influence of laser surface melting on the micropitting performance of 35CrMo structural steel gears // Materials Science & Engineering A 564 (2013) P. 1–7.
14. T. Slatter, H. Taylor, R. Lewis, P. King. The influence of laser hardening on wear in the valve and valve seat contact // Wear 267 (2009) P. 797–806.
15. Жиялков А. Ю., Рыжков М. А. Лазерная обработка рессорно-пружинной стали 50ХГФА // XII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлословов — молодых ученых. — Екатеринбург: УрФУ, 2011. — С. 340-342.
16. Волков М. В., Кишалов А. А., Храмов В. Ю. Применение волоконного лазера для закалки резьбовых соединений с целью повышения их износостойкости // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т 57, № 6, С. 20-25.
17. Яресько С. И. Повышение работоспособности металлорежущего инструмента на основе совершенствования технологических процессов лазерного импульсного упрочнения / Автореф. дисс. д.т.н. Волгоград 2010, 20с.
18. G. Telasang, J. Dutta Majumdar, G. Padmanabham. Wear and corrosion behavior of laser surface engineered AISI H13 hot working tool steel // Surface & Coatings Technology 261 (2015) P. 69–78.

19. R. Colaco, E. Gordo, E.M. Ruiz-Navas. A comparative study of the wear behaviour of sintered and laser surface melted AISI M42 high speed steel diluted with iron // *Wear* 260 (2006) P. 949–956.
20. Jiaren Jiang , Lijue Xue, Shaodong Wang. Discrete laser spot transformation hardening of AISI O1 tool steel using pulsed Nd:YAG laser // *Surface & Coatings Technology* 205 (2011) P. 5156–5164.
21. Qichun Sun, Tianchang Hua, Hengzhong Fan. Dry sliding wear behavior of TC11 alloy at 500 °C: Influence of laser surface texturing // *Tribology International* 92 (2015) P. 136–145.
22. B.S. Yilbas. Laser treatment of zirconia surface for improved surface hydrophobicity // *Journal of Alloys and Compounds* 625 (2015) 208–215.
23. D. Felgueroso, R. Vijande, J.M. Cuertos. Parallel laser melted tracks: Effects on the wear behaviour of plasma-sprayed Ni-based coatings // *Wear* 264 (2008) P. 257–263.
24. Kong De-jun, Xie Chun-yang. Effect of laser quenching on fatigue properties and fracture morphologies of boronized layer on Cr12MoV steel // *International Journal of Fatigue* 80 (2015) P. 391–396.
25. Aneta Bartkowska, Aleksandra Pertek, Michał Kulka. Laser surface modification of boronickelized medium carbon steel // *Optics & Laser Technology* 74 (2015) P. 145–157.
26. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева № 4 (83). С. 247-251.
27. Мацевитый В. М., Казак И. Б., Спольник А. И. Влияние лазерной обработки, карбонитрации и их сочетание с вакуумно-плазменным покрытием TiN на некоторые свойства стали P6M5 // *Вопросы атомной науки и техники*. 2001. № 2. С. 137-141.
28. J.Z. Lu , J.S. Zhong, K.Y. Luo. Strain rate correspondence of fracture surface features and tensile properties in AISI304 stainless steel under different LSP impact time // *Surface & Coatings Technology* 221 (2013) P. 88–93.

29. K.Y. Luo, T. Lin, F.Z. Dai. Effects of overlapping rate on the uniformities of surface profile of LY2 Al alloy during massive laser shock peening impacts // Surface & Coatings Technology 266 (2015) P. 49-56.
30. Гнюсов С.Ф., Дураков В.Г. Электронный луч в формировании неравновесных структур. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 115 с.