

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

Институт неразрушающего контроля
Направление подготовки 15.04.01 «Машиностроение»
Кафедра: Оборудование и технологии сварочного производства

Магистерская диссертация

Тема работы
Особенности формирования структуры ЗТВ и зон оплавления покрытия на основе стали 10P6M5 электронным лучом в вакууме

УДК 621.791.722.019.3.669.058

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1BM51	Курышин Константин Александрович		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гусельников М.Э.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2017 г.

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

Институт неразрушающего контроля
Направление подготовки 15.04.01 «Машиностроение»
Кафедра: Оборудование и технологии сварочного производства

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой ОТСП
_____ Киселев А. С.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
1ВМ51	Курышин К.А.

Тема работы:

Особенности формирования структуры ЗТВ и зон оплавления покрытия на основе стали 10P6M5 электронным лучом в вакууме
Утверждена приказом директора (дата, номер) 19.11.2015, 8934/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	25.05.2017
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>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></p>	Комплект образцов основного металла с композиционным покрытием на основе стали 10P6M5, облученных импульсным электронным лучом в вакууме в интервале тока луча 40...95 мА.
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	Наплавить композиционное покрытие на основе стали 10P6M5 электронным лучом в вакууме; оплавить наплавленные покрытия импульсным источником электронов с линейной разверткой в вакууме в широком интервале тока луча; изучить структуру оплавленных зон и ЗТВ. Построить распределения микротвердости в радиальном направлении приосевой части пучка; на основе анализа полученных данных обосновать наиболее рациональный режим обработки импульсным электронным лучом ранее наплавленного покрытия для дальнейшей реализации его в парах трения с высокими контактными нагрузками.

<p>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<p>Титульный лист. Цели и задачи. Материалы и методы. Микроструктура исходного покрытия и литого ядра. Микротвердость образцов. Микроструктура после импульсного электронно-лучевого оплавления. Микроструктура ЗТВ. Структура в области двух смежных дорожек оплавления. Зависимости от тока луча. Выводы.</p>
--	---

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)</p>	
<p>Раздел</p> <p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Консультант</p> <p>Николаенко В.С.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Гусельников М.Э.</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Литературный обзор, упрочнение лучами лазера</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>19.11.2015</p>
--	-------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гнюсов С.Ф.	д.т.н., профессор		19.11.2015

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ51	Курышин К.А.		19.11.2015

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

Институт неразрушающего контроля
Направление подготовки: 15.04.01 «Машиностроение»
Кафедра: Оборудование и технологии сварочного производства
Период выполнения: (осенний / весенний семестр 2016/2017 учебного года)

Форма предоставления работы:

магистерская диссертация <small>(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)</small>

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ – ПЛАН
Выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом работы:	25.05.2017
------------------------------	------------

Дата контроля	Название раздела(модуля)/ вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
15.03.2017	1. Литературный обзор.	15
16.03.2017	2. Постановка задачи.	10
16.03.2017	3. Наплавка покрытия 10P6M5 в вакууме.	11
17.03.2017	4. Оплавление дискретных зон на ранее наплавленном покрытии.	17
18.03.2017	5. Изучение структуры ЗТВ и зон оплавления после импульсной электронно-лучевой обработки.	20
10.05.2017	6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и Ресурсосбережение.	12
10.05.2017	7. Социальная ответственность	9
11.05.2017	8. Заключение	6

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гнюсов С.Ф.	д.т.н., профессор		19.11.2015

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОТСП	Киселев А.С.	к.т.н.		19.11.2015

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

Студенту:

Группа	ФИО
1ВМ51	Курышин К.А.

Институт	Неразрушающего контроля	Кафедра	ОТСП
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Машиностроение

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

Fast - анализ

В качестве объекта исследования выбран микротвердомер ПМТ-3М.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Расчет трудоемкости этапов;

1. Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом;
2. Определение значимости выполняемых функций объектом;
3. Определение значимости функций;
4. Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования;
5. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ;
6. Оптимизация функций выполняемых объектом.

Перечень графического материала:

При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ51	Курышин К.А.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1ВМ51	Курышин К.А.

Институт	Неразрушающего контроля	Кафедра	ОТСП
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Машиностроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) – чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера) 	<p>Рабочим местом является отдельное помещение (научная лаборатория). Поскольку данное помещение находится внутри здания, на проектировщика возможны действия следующих факторов:</p> <p>Вредные факторы: монотонный режим работы, отклонение показателей микроклимата, недостаточная освещенность, превышение уровня шума.</p> <p>Опасные факторы: повышенный уровень ультрафиолетовой радиации, пожар, электрический ток.</p>
<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</p>	<p>1. Техника пожарной безопасности на производстве (ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ).</p> <p>2. Техника безопасности при работе с электро- и радиотехническими устройствами (ГОСТ 12.1.006-84).</p> <p>3. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны ГОСТ 12.1.005-88 (с изм. №1 от 2000 г.) ССБТ.</p> <p>4. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. ГОСТ 12.1.019-2009 (с изм. №1) ССБТ.</p>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства) 	<p>Высокий уровень шума. Несоответствующая нормам температура или влажность воздуха помещения. Недостаточная освещённость. Поступление в зону дыхания сварочных аэрозолей. Чрезмерная запыленность и загазованность воздуха.</p>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); 	<p>При работе с установкой плазменной наплавки, которая соединена с сетью напряжения, возможны электрические замыкания (удары) для персонала и пожары. Повышенная температура поверхностей оборудования.</p>

<ul style="list-style-type: none"> – <i>электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита– источники, средства защиты);</i> – <i>пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)</i> 	<p>Согласно нормам, установлены средства пожаротушения. Повышенная температура поверхностей оборудования.</p>
<p>3. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>защита селитебной зоны</i> – <i>анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</i> – <i>анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</i> – <i>анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</i> – <i>разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</i> 	<p>Воздействие на окружающую среду сводится к минимуму, за счет отсутствия загрязняющих веществ. Поскольку все используемые материалы отправляются на дальнейшие исследования.</p>
<p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>перечень возможных ЧС на объекте;</i> – <i>выбор наиболее типичной ЧС;</i> – <i>разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</i> – <i>разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;</i> – <i>разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий</i> 	<p>Возможная чрезвычайная ситуация – пожар. К мерам по предупреждению будут относиться:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Планирование защиты населения и территории от ЧС на уровне предприятия (организации); 2. Создание запасов средств индивидуальной защиты и поддержание их в готовности; 3. Выявление угроз пожара и оповещение персонала; 4. Подготовка работающих к действию условиях ЧС; 5. Подготовка и поддержание в постоянной готовности сил и средств для ликвидации ЧС.
<p>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</i> – <i>организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны</i> 	<p>Соблюдение законов (налоговое законодательство, трудовой и гражданский кодексы). Руководитель (ответственный) принимает обязательства выполнения и организации правил эвакуации и соблюдение требования безопасности в помещении, а также контроль за исправностью работы в помещении.</p>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гусельников М.Э.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ51	Курышин К.А.		

Оглавление

Реферат	2
Zusammenfassung	3
Введение	4
1. Литературный обзор	6
1.1 Концентрированные потоки энергии и их виды	6
1.2 Упрочнение лучами лазера	6
1.3 Плазменная наплавка	15
1.4 Электронно-лучевая наплавка	16
1.4.1 Вневакуумная электронно-лучевая наплавка.....	17
1.4.2 Вакуумная электронно-лучевая наплавка	18
2. Постановка задачи.....	29
4. Экспериментальная часть.....	33
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	45
5.1 Описание главных, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом.....	45
5.2 Определение значимости выполняемых функций объектом	47
5.3 Определение значимости функций	51
5.4 Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования.....	52
5.5 Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ	54
5.6 Оптимизация функций выполняемых объектом.....	54
6. Социальная ответственность	55
6.1 Производственная безопасность.....	55
6.2 Экологическая безопасность.....	61
6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	62
Выводы	65
Список публикаций студента.....	67
Приложение А	68
Список используемых источников.....	79

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит: 81 страницу, в том числе 13 рисунков, 6 таблиц, 35 источников литературы.

Ключевые слова: ЗТВ, литое ядро, микроструктура, микротвердость.

Цель работы: особенности формирования структуры в зоне оплавления и зоне термического влияния композиционного покрытия на основе стали 10P6M5 в ходе вакуумного импульсного электронного воздействия в интервале тока луча 40...95 мА.

Результаты исследования: на основании полученных данных в работе можно обосновать 2 наиболее рациональных режима обработки импульсным электронным лучом ранее наплавленного покрытия. Первый: это режим обработки при токе луча до 64 мА, позволяющий получить в литом ядре дисперсную структуру с большим объемом остаточного аустенита и, следовательно, малой твердостью. Второй режим при токе луча 64...78 мА. Он способствует образованию в литом ядре скрытоигольчатого мартенсита с малым содержанием остаточного аустенита (~7...7,5 ГПа).

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе MicrosoftWord7.0, фотографии были получены с использованием микроскопа OLYMPUS GX51.

Микротвердость образцов измеряли на приборе ПМТ-3.

Zusammenfassung

Abschlusstraining Arbeitumfasst: Seite 81, darunter 13 Bilder, Tabellen 6, 35
Literaturquellen.

Stichwort: WEZ, geschmolzener Kern, Mikrostruktur, Mikrohärt.

Ziel: Eigenschaften der Strukturbildung in der Schmelzzone und die
Wärmeeinflußzone, auf der Grundlage der Wärme einfluss verbundbeschichtung
10P6M5 Stahl während der Vakuumbelichtungsgepulster Elektronenstrahl in dem
Strombereich 40...95 mA.

Ergebnisse: Auf der Grundlage der Befund in dem Werkstück 2
könnenzuvorgepulsten Elektronenstrahlschweiß Beschichtung den effizientesten
Betriebsmodusunter Beweisstellen. Erstens, dieser Verarbeitungsmodus,
wenn ein Strahlstrom von 64 mA, das einen Formkerneinerdispersen
Struktur miteinander großen Menge an restlichem Austenit zu erhalten, ermöglicht, und
somit eine geringe Härte. Der zweite Modus bei einem Strom von Strahl 64 ... 78 mA.
Esfördert die Bildung eines Gusskernskrytoigolchatogo Martensit mit einem niedrigen
Gehalt an restlichem Austenit (~7...7,5%).

Abschlusstraining Arbeit wird in einem Texteditor Microsoft Word 7.0 getan,
Bilder wurden erhalten unter Verwendung eines Mikroskops OLYMPUS GX51.

Die Mikrohärtewurden an Proben der PMT-3 gemessen.

Введение

В настоящее время широкое распространение в вопросах упрочнения рабочих поверхностей деталей механизмов и машин, работающих в условиях абразивного и гидроабразивного износа, получили методы наплавки, использующие концентрированные потоки энергии (КПЭ): лазер, плазма, электронный луч в вакууме и выведенный в атмосферу.

В качестве наплавочных материалов используется широкий круг промышленных композиционных порошков на основе аустенитной и аустенитно-мартенситной матрицы (например, порошки сталей 10P6M5, ПХ18ФНМ). Кроме того, научными группами готовятся разнообразные экспериментальные спёки смесей исходных компонентов. Все эти исследования позволили создать покрытия, обладающие высокой абразивной, газо- и гидроабразивной износостойкостью. Попытки применения данных покрытий в парах трения не позволили напрямую сохранить минимальный износ в широком интервале скоростей скольжения и нагрузок. В ряде случаев, для экспериментальных покрытий (например, на основе композиции «сталь 10P6M5+20% WC) это удалось решить, снизив интенсивность изнашивания до $0,1 \dots 0,2 \text{ мм}^3/\text{км}$ в интервале скоростей скольжения до 4 м/с и нагрузок до 100Н. Однако для промышленно выпускаемых порошковых композиций, например, стали 10P6M5 работа в паре трения при данных параметрах нагружения связана с развитием неравномерной интенсивности изнашивания: наличия области катастрофического изнашивания при нагрузках 40...60 Н [1].

Цель работы: особенности формирования структуры в зоне оплавления и зоне термического влияния композиционного покрытия на основе стали 10P6M5 в ходе вакуумного импульсного электронного воздействия в интервале тока луча 40...95 мА.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

- наплавить композиционные покрытия на основе стали 10P6M5 электронным лучом в вакууме;
- оплавить наплавленные покрытия импульсным источником электронов с линейной разверткой в вакууме в широком интервале тока луча (40, 44, 50, 56, 64, 71, 78, 86, 95мА);
- изучить структуру оплавленных зон и ЗТВ в двух плоскостях: параллельно и перпендикулярно оси пучка. Построить распределения микротвердости в радиальном направлении приосевой части пучка и в областях между смежными зонами оплавления в сечении образца перпендикулярном поверхности воздействия;
- на основе анализа совокупности полученных данных обосновать наиболее рациональный режим обработки импульсным электронным лучом ранее наплавленного покрытия для дальнейшей реализации его в парах трения с высокими контактными нагрузками.

1. Литературный обзор

1.1 Концентрированные потоки энергии и их виды

Концентрированные потоки энергии (КПЭ) – это средства, применяемые для термического воздействия на материалы, в целях проведения технологических операций таких как: сварка, термическая и размерная обработка, резка, напыление, наплавка. Обработка КПЭ – это воздействие на поверхность заготовки исключительно потоком энергии, носителями которой являются частицы: электроны, фотоны, атомы, ионы, сконцентрированы в пучки ограниченных поперечных размеров. Минимальными значениями плотности мощности энергии принимают $\sim 10^3$ Вт/см² [1].

В настоящее время используют КПЭ плотность мощности которых равна $W \approx 10^3 \dots 10^5$ Вт/см² и длительность импульса $\tau \approx 10^{-8} \dots 10^{-5}$ с. При воздействии (КПЭ) реализуется сверхбыстрый нагрев (до 10^{10} С/с) и затверждение материала. Эти процессы позволяют формировать в приповерхностном объеме материала аморфные и нанокристаллические структуры, метастабильные фазы, которые в традиционных технологических процессах невозможно получить [2].

В качестве источников КПЭ нашли широкое применение такие мощные источники как, импульсные лазеры [3], плазменные [4], ионные [5] и пучки электронов [6].

1.2 Упрочнение лучами лазера

В 60-х годов прошлого века начали производиться работы по исследованию влияния лазерного излучения на структуру и механические свойства материалов. На практике применяют лазеры, генерирующие излучения с длиной волны $\lambda = 0,3 \dots 10,6$ мкм. Лазеры нового поколения характеризуются повышенным общим КПД у таких лазеров как: CO₂ - с 5...10 до 8...15%; Nd:YAG - с 1...2 до 5...8%; у диодных лазеров - до 42...50%. Методы лазерной обработки образуют группы, основанные соответственно на нагреве,

плавлении и ударном нагружении материала в зависимости от плотности мощности излучения лазера и от времени его воздействия. В последние десятилетие начали активно развиваться комбинированные процессы наплавки, нанесения покрытий и термообработки. Эти процессы направлены на расширение возможностей лазерной обработки за счет совместного использования лазерного излучения и электрической дуги, струи плазмы.

Метод лазерного поверхностного упрочнения наиболее распространенный метод нагрева поверхностных слоёв металлов и сплавов посредством фазовых превращений в твердом состоянии. Для предотвращения оплавления поверхности обрабатываемого материала требуется предварительное нанесение покрытий, поглощающих лазерное излучение. Сюда также следует отнести упрочнение посредством закалки из жидкого состояния.

В результате воздействия лазерного излучения на железоуглеродистые сплавы, в случае обработки с оплавлением, образуются два слоя с четкой границей. Первый слой в основном имеет столбчатое дендритное строение. Вследствие высоких скоростей кристаллизации происходит преимущественный рост главных осей дендритов, направленных перпендикулярно к границе раздела слоев. Микроструктура первого слоя состоит из мелкоигольчатого мартенсита и остаточного аустенита (до 70%).

Второй слой (зона термического влияния) имеет мелкозернистую структуру, обусловленную фазовой перекристаллизацией $\alpha \leftrightarrow \gamma$ и пластическим деформированием под действием термических напряжений и последующей рекристаллизацией. Такое изменение структуры металла определяет повышенную износостойкость инструмента и деталей машин после обработки лазерным излучением.

Путем плавления можно осуществить такие методы поверхностной обработки, как легирование, аморфизацию, плакирование, а также производить лазерную очистку зерен металлов и сплавов. Толщина слоёв с высокой твердостью и износостойкостью может изменяться от нескольких микрон до

1...3 мм. Ударное нагружение, обусловленное воздействием "гигантских" импульсов излучения, определяет ударное упрочнение материалов [2].

Поверхностное упрочнение лучом лазера характеризуется рядом преимуществ [8]:

- упрочнением локальных (по глубине и площади) объемов деталей в местах их износа с сохранением исходных свойств материала в остальном объеме;
- упрочнением поверхностей труднодоступных полостей, углублений, куда луч лазера может быть введен с помощью оптических устройств;
- получение заданных свойств обрабатываемых поверхностей деталей путем их легирования различными элементами с помощью излучения лазера;
- получение при необходимости микрошероховатости упрочненных поверхностей деталей;
- отсутствием деформаций обрабатываемых деталей, обусловленных локальностью термообработки, что позволяет практически полностью исключить финишную обработку;
- отсутствием механического воздействия на обрабатываемый материал, что вместе с бесконтактностью лазерного нагрева обуславливает простоту автоматизации процесса термообработки по контур, в том числе деталей сложной формы.

Недостатки лазерного упрочнения [8]:

- необходимость применения специальных покрытий для увеличения поглотительной способности облучаемых поверхностей;
- недолговечность и большая стоимость материалов линз и зеркал, применяемых для управления лазерным излучением в пространстве;
- низкий технологический КПД;
- малая производительность процессов при обработке поверхностей, имеющих большую протяженность;

- высокие внутренние напряжения растяжения в дорожках упрочнения, что приводит к трещенообразованию;
- возможность образования как внутренних, так и наружных пор при упрочнении с оплавлением за счет выделения газов при выгорании неметаллических включений в основном или наплавленном металле;
- применение защитных атмосфер при использовании в качестве наплавочного материала не самофлюсующихся порошков;
- сравнительная дороговизна процесса, обусловленная высокой себестоимостью лазерного нагрева;
- значительное тепловое воздействие на наплавленное изделие при использовании гибридной лазерно-плазменной наплавки, приводящее к остаточным термомодеформациям.

Формирование микроструктуры существенно зависит от термического воздействия на затвердевающий металл. Лазерная наплавка характеризуется чрезвычайно высокими скоростями охлаждения, превосходящими на порядок скорости, достигаемые при традиционных методах наплавки. Промышленные сплавы системы Ni-Cr-B-Si, легированные углеродом, при затвердевании кристаллизуются с выделением первичных упрочняющих карбидных и боридных, а также сложных карбоборидных фаз, γ -твердого раствора и эвтектики ($\gamma + \text{Ni}_3\text{B}$).

При лазерной наплавке на поверхности достигается температура кипения и расплавления самых тугоплавких компонентов. Скорости охлаждения могут составлять порядка нескольких тысяч градусов в секунду, что гораздо больше скоростей, характерных для традиционных методов наплавки. Это приводит к измельчению первичной структуры. Так, расстояние между осями второго порядка при наплавке токами высокой частоты составляет $(12 \dots 20) \cdot 10^{-4}$ м, при газопламенном переплаве - $(6 \dots 10) \cdot 10^{-6}$ м, а при лазерной наплавке - $(2,5 \dots 0,5) \cdot 10^{-6}$ м.

Размеры структуры составляющих также зависят от скорости охлаждения расплавленной ванны. При лазерной наплавке, проведенной при

невысоких скоростях (до $16,7 \cdot 10^3$ м/с), размер упрочняющей фазы не превышает $(2...4) \cdot 10^6$ м.

Увеличение скорости наплавки до $(33,3...50) \cdot 10^3$ м/с приводит к существенному измельчению упрочняющих фаз, в некоторых случаях при этом наблюдается полное растворение карбидов и боридов. Оптической микроскопией при увеличении 2000 раз они не обнаружены.

Таким образом, в области высокопроизводительных режимов особенностью формирования структуры при лазерной наплавке сплавов типа Ni-Cr-B-Si, легированных углеродом, является возможность возникновения квазиэвтектической структуры, содержащих вместо трех только 2 фазы: сильно пересыщенный γ -твердый раствор на основе никеля и фазу типа борида никеля Ni_3B , причем размер частиц второй фазы не превышает $5 \cdot 10^{-6}$ м [6].

В работе [9] изучались возможности лазерного легирования при изготовлении быстрорежущего инструмента. В итоге показаны следующие особенности лазерно-легированных слоев:

- при значительной твердости (более 10 ГПа) покрытия обладают очень низкой хрупкостью, близкой к нулю, особенно, после повторного лазерного переплава;
- тепловое воздействие вплоть до 900 °С не приводит к укрупнению элементов структуры и значительному разупрочнению;
- кроме высокой износостойкости покрытия обладают удовлетворительной коррозионной стойкостью.

Это указывает на возможность применения таких покрытий в деталях, эксплуатируемых одновременно в условиях износа и агрессивной среды при высоких рабочих температурах.

Таким образом, лазерное легирование создает предпосылки для получения высококачественных изделий, работающих в тяжелых условиях; для интенсификации режимов их эксплуатации; ужесточения скоростей и нагрузок. Экономический эффект от применения лазерного легирования состоит в значительном снижении расхода дорогостоящих и дефицитных материалов,

повышении долговечности различных деталей конструкций, оборудования и инструмента.

В работе [10] производились исследования структуры и свойств инструментальных сталей после лазерного упрочнения. Было определено, что лазерная закалка сталей У10А и 9ХС со скоростью 10 мм/с является наиболее оптимальной в границах исследуемых параметров как для отожжённых, так и для закалённых исходных структур. При этом твердость составила 10950 МПа и 11300 МПа соответственно.

Авторами [11] производились исследования по поверхностному упрочнению изделий из порошковых сталей при использовании лазерного нагрева. Этим исследованием авторы показали, что метод лазерной термической обработки порошковых низколегированных материалов является наиболее высокоэффективный, менее затратный способ для увеличения механических и эксплуатационных свойств. При использовании мощности излучения 350...550 Вт волоконного лазера, возможно, обеспечить глубину закалки 0,15...0,45 мм если скорость закалки составляет 6,28 мм/с. Образцы, подвергшиеся данному типу лазерного облучения, показывают, что предоставляется возможность применять данный вид термообработки для того что бы повысить механические свойства порошковых материалов. Если повысить мощность больше 550 Вт и кратность до 3 раз, то это приведет к оплавлению поверхности, вследствие этого увеличение значения кратности термообработки не способствует улучшению эксплуатационных свойств. Происходит увеличение микротвердости при лазерной термообработки порошковых материалов примерно в 2...2,5 раза, твердости в 2...2,3 раза, при этом скорость изнашивания поверхности возможно уменьшить в 3...5 раз. При использовании закалочных свойств волоконных лазеров отпадает необходимость в нанесении поглощающих покрытий, это способствует дополнительному снижению стоимости данного процесса и делает его экологически чистым.

В работе [12] рассматривалось повышение износостойкости стальных поверхностей путем лазерной обработки. Были получены следующие выводы:

- проведенные эксперименты показали возможность и эффективность упрочнения валиков переключения передач индукционной закалкой взамен нитроцементации. Определены параметры индукционной обработки, обеспечивающей получение требуемой структуры и твердости изделий;
- использование индукционной закалки позволит существенно сократить технологический цикл, повысить в 4...5 раз производительность обработки, уменьшить затраты электроэнергии, улучшить условия труда и экологическую обстановку.

В работе [13] осуществлялось прогнозирование структурно-фазовых превращений в железоуглеродистых сталях при лазерном упрочнении с позиции термодинамического подхода. Были получены следующие результаты:

- формирование мартенситной структуры при лазерной обработке железоуглеродистых сталей определяется двумя факторами: содержанием углерода в поверхностном слое и полнотой протекания процесса гомогенизации аустенита при нагреве;
- для зоны оплавления, в которой при нагреве реализуется полное растворение исходной структуры стали, формирование мартенситной структуры становится возможным при содержании углерода свыше 0,22 вес.%;
- для переходной зоны протекания диффузионных процессов при нагреве углеродистых сталей приводит к формированию аустенитных зерен с разной концентрацией углерода. Формирование структурно-фазового состава этой зоны при лазерной обработке зависит от исходной структуры стали и распределения углерода относительно критических концентраций $C^{\alpha-\alpha}$ и $C^{\gamma-\gamma}$.

В работе [14] производилось упрочнение высокопрочного чугуна излучением YAG:Nd-лазера. Было получено, что эффективность применения

импульсного YAG:Nd-лазера для упрочнения высокопрочного чугуна ВЧ60-2. Показано, что при флюенсе лазерного облучения свыше 28 Дж/мм² происходит оплавление поверхности чугуна. Глубина упрочненного слоя, микротвердость которого в 3...4 раза выше микротвердости исходного материала, превышает 0,5 мм.

Автором [15] рассматривалось влияние состава кобальтовой фазы твердых сплавов на изнашивание инструмента после лазерного упрочнения. Сформулированы следующие выводы:

- для лучевой обработки (ЛО) инструмента наибольший интерес представляют следующие режимы бездефектной обработки: вводимая энергия ($\epsilon = 1,5 \text{ Дж/мм}^2; 1,1 \text{ Дж/мм}^2$) и количество импульсов ($N = 1; 10$), которые обеспечивают образование жидкой фазы на основе твердого раствора Со (W, С) в межзеренных промежутках зоны лучевого воздействия (ЗЛВ). Наиболее предпочтительным при облучении является использование многократного воздействия. При этом интенсифицируется процесс дополнительного растворения периферии зерен WC в кобальте ~25 %. При изнашивании это приводит к росту адгезионной связи карбидных зерен с Со-связующей, при этом обеспечивается стойкость инструментов в условиях адгезионно-усталостного износа;
- особой отличительной чертой импульсного лазерного облучения твердых сплавов является способность к обогащению поверхности ЗЛВ кобальтом. Наряду с изменением состава Со-фазы это приводит к уменьшению интенсивности изнашивания твердосплавного инструмента, особенно в период его приработки;
- в условиях работы предпочтительно использовать облученный твердосплавный инструмент, который подвержен адгезионно-усталостному износу. Непосредственно наибольший рост стойкости инструмента возможно достичь при бездефектной обработке в следующих режимах: $\epsilon = 1,5 \text{ Дж/мм}^2, N = 1$ и $\epsilon = 0,9 \dots 1,1 \text{ Дж/мм}^2, N = 10$.

Увеличение адгезионной связи зерен карбидов скобальтовой связкой способствует повышению эксплуатационных свойств, общему снижению износа, уменьшению числа сколов и микровыкрашиванию на режущей кромке резцов после ЛО. Способность обогащать облученную поверхность Со-фазой дает способность к дополнительной стойкости инструмента на участке приработки. Лазерное импульсное облучение при оптимально подобранных режимах никак не влияет на интенсивность изнашивания резцов при работе твердосплавного инструмента в условиях диффузионного износа, зато существенно может изменить характер износа упрочняемого инструмента. Стойкость облученного инструмента может изменяться в следующих пределах (от 40 % до ≥ 2 раз) это зависит от марки обрабатываемого материала и режимов обработки.

Микроструктура и свойства быстрорежущей стали после лазерной обработки рассматривались в работе [26], в которой определено:

- твердость быстрорежущей стали М2 увеличивается с помощью лазерного упрочнения. Твердость так же возрастает за счет увеличения мощности плотности лазера;
- твердость закаленной зоны близкосвязана с процессом обработки предварительным нагревом подложки. Большая твердость и благоприятная микроструктура может быть получена после закалки при температуре 1220 °С и отпуске 560 °С;
- размер аустенитного зерна и количество остаточного аустенита уменьшается после лазерной обработки;
- количество нерастворенных карбидов уменьшается после лазерного упрочнения поверхности;
- закаленная быстрорежущая сталь М2 имеет более высокую прочность, чем традиционная отожженная сталь. Распределение твердости в зоне лазерного облучения может быть улучшена с последующей закалкой.

Модификация стали X40CrMoV5 с помощью лазера приводит к развитию поверхностного слоя, в котором можно указать зону плавления, зону термического влияния и зону раздела [33, 34]. Толщина слоев тесно связана с параметрами лазерного воздействия, а толщина оплавленного слоя значительно изменяется вместе с увеличением мощности лазерного пучка. Была получена мелкозернистая дендритная структура в расплавленной зоне с кристаллографической ориентацией, связанной с динамическим оттоком тепла от зоны воздействия лазерного луча. В структуре наблюдалось появление неконденсированных зерен карбида вольфрама по сравнению с основным материалом, переменная концентрация которого связана с флуктуациями расплавленного металла при легировании.

При испытаниях на износ после лазерного упрочнения данная сталь показала хорошие результаты износостойкости поверхностных закаленных слоев по сравнению с не упрочненной сталью.

1.3 Плазменная наплавка

В индустриальном производстве плазменную наплавку начали применять в СССР и США в 1960-х годах. Плазменную наплавку в большинстве случаев выполняют постоянным током прямой полярности. По виду применяемого присадочного материала способы плазменной наплавки делят на три группы:

- наплавка проволокой и прутками;
- наплавка по неподвижной присадке, закрепленной на наплавляемой поверхности;
- наплавка порошком.

Вид присадочного материала определяет технологические возможности способа наплавки, конструкцию плазматрона и схему его включения в электрическую цепь. Плазменная наплавка с присадкой порошка в наибольшей степени отличается от других способов плазменной наплавки применяемыми материалами, оборудованием и технологическими возможностями.

Порошки могут быть получены практически из любого сплава независимо от его твердости, пластичности, степени легирования. Порошок дисперсностью 100...500 мкм вводится в дугу прямого действия потоков транспортирующего газа. Производительность наплавки зависит от размеров и формы изделий, толщины наплавляемого слоя, типа присадочного порошка и других факторов и находится в пределах 0,8...0,6 кг/ч.

При данном методе наплавки возникает способность включать возникновение между основным металлом и катодом электрической дуги, что обеспечивает переход в плазменное состояние рабочего газа, который подается непосредственно в зону дуги. Так же струя высокотемпературной плазмы истекает из сопла горелки, обеспечивая при этом плавление наплавляемого материала. При этом способе наплавки две проволоки подаются с постоянной скоростью в сварочную ванну под плазменной горелкой, последовательно подключенные к источнику питания переменного тока, где происходит их быстрое расплавление под действием теплоты плазмы в сочетании с нагревом электросопротивлением самих проволок при пропускании переменного тока. Для образования плазмы используют смесь гелия (75%) с аргоном (25%), а в качестве защитного газа применяют аргон, защищающий сварочную ванну и кристаллизирующийся наплавочный металл позади плазменной горелки от действия окружающей среды. При наплавке в условиях поперечного колебания плазменной горелки получают валик шириной до 64 мм. В качестве наплавочного материала используют коррозионностойкую сталь, никель и его сплавы, сплавы меди [8].

1.4 Электронно-лучевая наплавка

Эффективным методом упрочнения поверхности является вакуумная наплавка в пучке электронов и в потоке релятивистских электронов, выпущенных в атмосферу, с использованием порошковых материалов. Данный способ наплавки получил более широкое научное исследование благодаря

созданию источника с плазменным эмиттером в ИСЭ СО РАН и разрабатываемых в институте ядерной физики СО РАН ядерной физики.

Электронно-лучевое легирование используют для улучшения свойств обладающих недостаточно высокими характеристиками низкоуглеродистых сталей, титановых сплавов, меди и других металлов. Благодаря разделению функции между основной частью детали, как правило, более дешевой, и поверхности (трибологические свойства, жаростойкость и жаропрочность, коррозионная стойкость) открывается возможность широко использовать в разных отраслях промышленности данные конструкции. Это позволяет увеличить срок службы конструкций с одновременным снижением расхода дорогостоящих сталей и легирующих элементов [7].

1.4.1 Вневакуумная электронно-лучевая наплавка

Ускорители электронов, созданные в институте ядерной физики (ИЯФ) СО РАН, обеспечивают глубокое проникновение электронов в металл с высокой скоростью обработки поверхности (1...5 см/с). Глубина проплавления колеблется от 0,1 до 10 мм. Электромагнитная развертка может отклонять пучок на угол 45° от вертикали, что обеспечивает обработку полос разной ширины на изделиях. Расстояние от выпускного отверстия пучка до обрабатываемого изделия обычно не превышает 150 мм. Наиболее частое расстояние, используемое при закалке и наплавке 90 мм. Легирующие элементы или химические соединения (карбиды, оксиды, бориды и т.д.) в виде смеси с флюсом наносятся на поверхность непосредственно перед обработкой [5].

Новым методом повышения твердости поверхности является поверхностная наплавка и легированием на воздухе в пучке высокоэнергетических релятивистских электронов. При этом линейная производительность обработки достигает 0,20 м/с, а при сканировании электронного луча 20 см²/с [16].

Для получения наплавленных поверхностных слоев с высокими эксплуатационными характеристиками основным является выбор наплавляемых легирующих компонентов. Для наплавки образцов, стойких против абразивного изнашивания, в качестве материалов широко применяют сплавы на основе WC, V_4C , TiC, TaC, CrC, содержащие Cr, C и V, что позволяет формировать на поверхности гетерогенную структуру, обладающую за счет выделения карбидов и карбоборидов особенно высокой твердостью и износостойкостью. В случае лазерного легирования железа и сталей порошками карбидов и смесями BK3, BK5 и T15K6, наибольшая стойкость и износостойкость наблюдается при выделении твердых тугоплавких соединений WC, TiC, VC, CrC, CrB_2 . При электронно-лучевой вакуумной наплавке и легировании, наилучшими свойствами обладают слои с заэвтектической структурой, содержащие выделение карбидной фазы M_6C , M_2C , MC, M_7C . Для получения структуры такого типа стараются применять такие же материалы для вневакуумной электронно-лучевой наплавке [17].

1.4.2 Вакуумная электронно-лучевая наплавка

Многими авторами рассматривается вопрос по вакуумной наплавке в пучке электронов с использованием порошковых материалов. Создано новое высококачественное покрытие с мелкозернистой структурой и минимальной пористостью (менее 1%), с использованием высокоэффективной технологии электронно-лучевой наплавки в вакууме разработанной, в институте физики прочности и материаловедения (ИФПМ) СО РАН.

Электронно-лучевая наплавка (ЭЛН) в вакууме является эффективным методом в качестве формирования упрочненного слоя. Данный вид наплавки обладает рядом преимуществ отличающий её от других методов нанесения покрытий:

- благодаря вакуумной среде, в которой проходит наплавка, осуществляется рафинирование наплавленного металла;

- возможность плавной и точной регулировки мощности электронного луча, в широких пределах, позволяет проводить наплавку с минимальным проплавлением основного металла и сохранять неизменный химический состав наплавленного металла;
- простота технической реализации сканирования электронного луча позволяет задавать необходимые размеры наплавочной ванны путем изменения длины развертки электронного луча и наряду с плавной регулировкой мощности легко управлять технологическими параметрами процесса наплавки;
- небольшие размеры ванны расплава, концентрированный ввод энергии до 10^5 Вт/см² и значительный перегрев ванны в зоне действия электронного луча способствует растворению твердых частиц в сварочной ванне, а минимальное время её существования за счет быстрого теплоотвода и большей скорости охлаждения (до 10^4 °С/с) расплавленного металла формируют пересыщенный раствор легирующих элементов в матрице.

Дисперсность порошков, применяемых для ЭЛН в вакууме, составляет порядка 100...350 мкм. Если дисперсность порошка слишком мала (<100 мкм), то данные порошки недостаточно сыпучи в вакууме, происходит их выдувание под влиянием паров ванны и вследствие этого, затрудняется подача их непосредственно в ванну расплава. Для порошков с большой дисперсностью (>350 мкм) порошков требуется больше энергии для их расплавления, это приводит к ненужному проплавлению основного металла, при этом происходит увеличение остаточных напряжений и рост зерна в покрытии [8].

Проводились исследования по тому, как повлияет тепловложение на структуру и твердость покрытия при наплавке одиночного валика при плазменной порошковой наплавке стали 10P6M5 [18]. Увеличение значения погонной энергии плазменно-порошковой наплавки в пределах 20...42 кДж/см приводит к увеличению ширины наплавленного валика приблизительно в два раза и глубины проплавления подложки (основного металла) в пределах

0,2...0,9 мм. Если увеличить тепловложения в процессе наплавки порошка стали 10P6M5 можно снизить долю эвтектики в объеме наплавленного металла в 2 раза, увеличить количество мартенсита в объеме матрицы с 72 до 84 % и средние размеры частиц карбидов ванадия с 0,75 до 2 мкм. Увеличение размера мартенситных пластин напрямую связано с ростом количества мартенсита. Если тепловложения недостаточно велики, вблизи границы сплавления и в верхней части наплавленного валика формируется слой материала толщиной ~100...150 мкм в котором фиксируется увеличение количества дисперсных карбидов до ~4 %, а эвтектическая сетка карбидов отсутствует. С увеличением погонной энергии до 25 кДж/см средняя величина микротвердости сохраняется на уровне 860 HV, если тепловложение увеличить до 30 кДж/см то микротвердость падает до 780...790 HV и дальше изменяется с последующим ростом тепловложения.

Авторы [19] исследовали, как повлияет многопроходная электронно-лучевая наплавка на структуру и свойства покрытия на основе порошка стали 10P6M5. Ими было определено, что с увеличением числа проходов электронного луча формируется мультимодальное распределение карбидов по размерам. Матрица представляет собой мартенситно-аустенитную смесь. Мартенситная фаза с увеличением числа проходов электронного луча изменяется от мелкодисперсного (бесструктурного) до крупноигльчатого мартенсита. Количество мартенсита увеличивается с ростом числа проходов, что приводит к постепенному росту средней величины микротвердости исследуемых покрытий от ~5950 до ~7700 МПа и более однородному ее распределению.

В работе [20] производили наплавку порошка ПГ-12Н-01 на массивные (200кг) «холодные» поверхности большой площади (0.5 м²) (кристаллизаторы для непрерывной разливки стали). Практические исследования и теоретические расчеты показали, что при электронно-лучевой наплавке порошка ПГ-12Н-01 на кристаллизатор в зоне взаимодействия электронного пучка с поверхностью кристаллизатора образуется область с избыточным давлением порядка

3...5атм., которое не позволяет использовать классическую схему наплавки по технологии электронно-лучевой наплавки. В этом случае часть наплавленного порошка не попадает в ванну расплава и отбрасывается в сторону потоком частиц меди, испаряющихся с поверхности ванны расплава, снижая коэффициент использования наплавляемого материала. Чтобы этого избежать, для нанесения покрытия была разработана комплексная технология, включающая в себя газопламенное напыление покрытия с последующим оплавлением электронным пучком. Газопламенным методом на упрочняемую поверхность напыляли Ni-Cr-покрытие толщиной 0.8 ± 0.2 мм, после чего проводилось его оплавление электронным пучком. В результате применения комплексной технологии сформировалось качественное покрытие без дефектов и пор с твердостью 4200 МПа. При этом не произошло деформирование медной основы и растрескивание самого покрытия, что, вероятно, связано с относительно небольшой толщиной сформированного утолщенного слоя и низкими термическими (структурными) напряжениями в системе «подложка – покрытие».

В работе [21] исследовано формирование бимодальной структуры в материале покрытия при электронно-лучевой наплавке. Было определено, что определяющим фактором в процессе формирования бимодальной структуры наплавленного материала является температура ванны в зоне действия электронного луча, которая, в свою очередь, определяется технологическими параметрами процесса электронно-лучевой наплавки. Основными из них является ток электронного луча, геометрические параметры развертки луча, скорость наплавки и температура подложки. Общим во всех случаях электронно-лучевой наплавки является формирование сильно пересыщенного раствора при быстрой кристаллизации расплава. Малое время существования жидкой ванны не позволяет твердым частицам полностью раствориться в матрице, поэтому при старении или отпуске наплавленного слоя, который может быть проведен в едином цикле наплавки, будет формироваться бимодальное распределение частиц упрочняющей фазы.

Сформированное покрытие электронным лучом в вакууме, основой которого является сталь Р6М5 и композиционный материал сталь Р6М5+20вес%. WC, проверялось на изнашивание в трибологическом контакте со сталью ШХ15 в большом диапазоне нагрузок и скоростей [22]. При скоростях скольжения 2,4 и 3,6 м/с и нагрузках 60 и 100 Н образуются две зоны сильного износа покрытий при трении сталь Р6М5 - сталь ШХ15. А при нагрузках 20...40 и 60...80 Н происходит образование двух установившихся областей износа (рисунок 1). Сам процесс износа возникает при скоростях 1,2 м/с, прикладываемых нагрузках 20...40 Н и скоростях 2,4 и 3,6 м/с и одновременно с этим происходит пластическое оттеснение и микрорезание частицами износа. Если увеличить нагрузку и оставить скорость изнашивания 1,2 м/с, то это приведет к тому, что увеличится частичное выкрашивание эвтектической сетки карбидов. Эта взаимосвязь показывает, что материал охрупчивается, в связи, с частичным превращением остаточного аустенита в деформированный мартенсит. С использованием скоростей 2,4 м/с и 3,6 м/с и нагрузки 60 Н происходит интенсивное изнашивание. Это говорит о том, что происходит размягчение связки в непосредственной близости к поверхностной области покрытия, высокотемпературное фазовое превращение $\alpha \rightarrow \gamma$ в матрице, разрушается сетка древовидных эвтектических карбидов, в зону трибоконтакта между покрытием и стальным колесом происходит выжимание матрицы и, вследствие этого, происходит частичное удаление окислов в продукты износа и интенсивное окисление. Вторым установившемся интервалом износа является интервал при нагрузках 60...80 Н. Он обусловлен тем, происходит практически сплошное формирование оксидного слоя на поверхности покрытия. Данный слой начинает разрушаться с увеличением нагрузки до 100 Н, это способствует развитию второй зоны катастрофического износа.

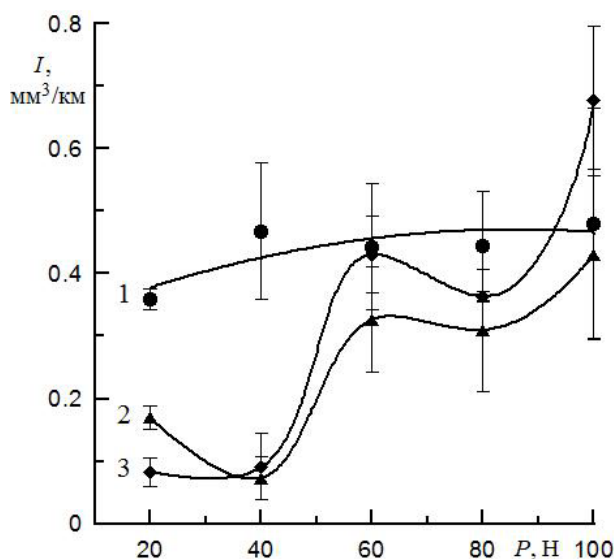


Рисунок 1 – Зависимость интенсивности изнашивания от скорости скольжения и нагрузки для покрытия сталь 10P6M5 (а); скорость скольжения: 1 – 1,2, 2 – 2,4 и 3 – 3,6 м/с [22]

При использовании в паре трения композиционный материал сталь P6M5+20%WC–со сталью ШХ15 происходит существенное снижение величины изнашивания данного покрытия приблизительно в 2–3 раза по сравнению с использованием покрытия на основе стали P6M5. Одновременное увеличение объёмной доли карбидной фазы и остаточной аустенитной матрицы приводит к этому. Так же при использовании данного композиционного покрытия с ростом нагрузки покрытие изнашивается линейно при скоростях скольжения 2,4 и 3,6 м/с. Уже при 20 Н начинают формироваться участки оксидного слоя.

Аналогично формировалось мультимодальное композиционное покрытие на основе стали P6M5–(WC+TiC) и изучали, как повлияет содержания карбида вольфрама в исходной наплавочной смеси на структурно-фазовый состав композиционного покрытия [23]. Было определено, что количество карбидов вольфрама в общем объеме вводимой упрочняющей фазы напрямую влияет на количество остаточного аустенита в покрытии. Если общий объем матрицы покрытия содержит карбидной составляющей 20%, то максимальное количество аустенита составляет 75 %. Количество остаточного

аустенита уменьшается до 40...50 % от общего объема матрицы, если происходит увеличение содержания карбидов.

Дальнейшие исследования показывают, что мелкодисперсный мартенсит начинает образовываться в образцах после наплавки в непосредственной близости к карбидным включениям титана, их механических соединений различных включений или может полностью окружать эти включения. До 50 % аустенита превращается в игольчатый мартенсит при однократном отпуске. Слабое растворение частиц карбидов титана наблюдается в жидкой металлической ванне расплава.

В работе [24] было исследовано влияние электронно-лучевой обработки на структуру и механические свойства быстрорежущей стали. Было определено, что после электронно-лучевой обработки микротвердость быстрорежущей стали Р6М5 повышается до 950 МПа и износостойкость увеличивается в 1,3 раза по сравнению с исходным материалом.

Электронно-лучевая обработка позволяет получить модифицированный слой с высокой твердостью и повышенной стойкостью к абразивному износу. В результате электронно-лучевой обработки поверхностный слой образцов быстрорежущих сталей обладает более высокой микротвердостью и износостойкостью.

Изучение поверхностного легирования высокованадиевой быстрорежущей стали на подложке из ковкого чугуна с использованием плазменной дуги и изучение микроструктуры и износостойкости проводилось в работе [25]. Было определено, что легированный слой имеет микроструктуру в основном из V сфероидальных частиц MC с размером менее 5 мкм. Шаровидные частицы MC в сочетании с несколькими жесткими фазами, такими как M_7C_3 , $M_{23}C_6$ и мартенсита, диспергированные в матрице ледебурита, делают легированную высокованадиевую быстрорежущую сталь (ВВБРС) твердой, менее восприимчивой к растрескиванию. Эксперименты показывают отличную трибологическую производительность слоя ВВБРС. Частицы твердых карбидов действуют как препятствие от истирания и

адгезионного износа. Легированный слой ВВРС обеспечивает превосходное решение для повышения износостойкости чугуна с шаровидным графитом.

В работе [26] рассматривали быстрорежущую сталь, поверхность которой была импульсным источником электронов. В результате исследований получили. Структурные и фазовые состояния в приповерхностных областях высокопрочной стали $W_6Mo_5Cr_4V_2$ существенно изменились. Было получено превращение типа α' -Fe мартенсита в аустенит γ -Fe при этом остаточные напряжения не были полностью удалены. С увеличением числа импульса, карбиды типа M_6C в пределах приповерхностного слоя постепенно уменьшаются из-за жидкой растворенной фазы и преобразовываются в мелкие карбиды типа MC . Так же после поверхностной модификации наблюдалось очищение зерна в приповерхностном слое, рафинирование от примесей и т.д. Все это способствует улучшению изнашиванию и коррозионной стойкости данной стали.

Авторами [27] была изучена модификация свойств стали M2 трибологическим путем смешивания плазмы. Трибологические свойства стали M2 могут быть улучшены с помощью системы Zr/M2 стали. В результате облучения в образовавшемся смешанном слое содержатся атомы (Zr), подложки (M2 сталь) и плазмообразующего газа (N). Концентрация циркония в смешанном слое зависит от энергии, вложенной в поверхностном слое, и может быть проконтролирована с помощью режимов облучения: конденсаторов начального напряжения и числа импульсов. Увеличение энергии осаждения в поверхностном слое приводит к уменьшению концентрации циркония в смешанном слое. Облучение в атмосфере азота приводит к образованию из ZrN нитридов в поверхностном слое толщиной несколько сотен нанометров. Зарождение жестких стабильных нитридов при определенных режимах обработки позволяет избежать снижения твердости вследствие растворения упрочненных карбидов и позволяет расширить температурный диапазон использования стали M2. Модифицированный слой обладает высокой

твердостью, низким коэффициентом трения и высокой термической стабильностью.

В работе [28] речь шла о поверхностных свойствах стали М2 обработанной плазмой в импульсном режиме. Каждый импульс концентрированного потока энергии вызывает сверхбыстрый тепловой цикл и модификацию поверхности. Плавящийся электрод вызывает ионизацию атомов вольфрама (W) и азота (N) и они легируют в поверхность, что означает присутствие механизма диффузии. Значение микротвердости увеличивается приблизительно в три раза. Параметры процесса влияют на модификацию слоя. С увеличением числа импульсов происходит увеличение толщины модифицированного слоя. Оптимальными параметрами для идеальной толщины модифицированного слоя и расстояние от сопла составляет 60 мм и 100 мм. Обработка импульсам методом приводит к существенному изменению структурно-фазового состава быстрорежущей стали М2. В модифицированном слое образовались новые фазы, такие как Fe_2N , W_3O . Интенсивность пика фазы было увеличено с увеличением числа импульсов. Наблюдаемые изменения механических свойств хорошо согласуются со структурно-фазовыми превращениями. Увеличение количества импульсов или интенсивности энергии, поглощаемой поверхностью, приводит к росту значения микротвердости. Величина твердости стали М2 может быть увеличена в три раза в очень короткий промежуток времени при помощи плазменной импульсной обработки.

Авторами [29] было исследовано влияние метода термоциклирования с помощью электронно-лучевой наплавки на структуру и износ стали М2. Термические условия, созданные в процессе многократного прохода электронным пучком в вакууме, включают мультимодальные размеры распределенных усиленных частиц в подсистеме карбида из закаленного слоя на основе стали М2. Мелкозернистой осадкой являются эвтектический карбид M_6C с размером зерен 0,65 мкм (VC) и вторичного карбида $M_6C < 0,25$ мкм. Содержание объема вторичных карбидов M_6C и остаточного аустенита может

регулироваться в широких пределах в зависимости от воздействия тепловых условий. Наибольшее количество остаточного аустенита составляет от ~ 25 до 30 % общего объема матрицы, что соответствует наибольшее количество вторичных карбидов ~7.5 %. Износостойкость покрытий улучшена из-за $\gamma \rightarrow \alpha'$ мартенситного превращения и наличием дисперсных вторичных карбидов в объеме зерен матрицы независимо от типа абразивных частиц.

Влияние карбида ванадия на сухое трение, поведение износа порошка быстрорежущей стали М2 обработанной концентрированными потоками энергии исследовались в работе [30, 31]. Испытания осуществлялись в системе палец-диск и шар на диске при линейном возвратно-поступательном движении шара по плоскости, армированной сталью М2 спеченной при различных установках. На основе полученных экспериментальных данных авторы сделали следующий вывод: устойчивость к сухому износу является сложной функцией микроструктуры и твердости. Существует хорошая корреляция между результатами, полученными при этих двух схемах испытаний. Однако установлено, что при схеме палец-диск наблюдается больший износ и, следовательно, она менее чувствительна к внешним влияниям. Устойчивость к износу оказывается лучшим для образцов, спеченных с помощью КПЭ. Худшее поведение сопротивления наблюдается у неармированной стали М2 спеченной в трубчатой электрической печи. Эффект от усиления отличается для обычно спеченных и плазменно спеченных образцов. Для образцов, спеченных в трубчатой печи, улучшение износостойкости, изучены с помощью системы палец-диск, наблюдалось увеличение концентрации VC, это связано с увеличением твердости. Тем не менее, для достижения наилучших трибологических свойств достаточно содержание VC 3об.%. Более высокое содержание VC приводит к увеличению потерь на износ, даже при наблюдении упрочняющего эффекта. Это может быть связано с более крупным выпадением в осадок, с низким уровнем сцепления с матрицей. Образцы, спеченные в плазменной печи, показали лучшие трибологические свойства. Это связано с более однородной и более тонкой микроструктурой с новыми фазами и с

нанометровыми размерами в минимальное время, которое обеспечивает высокую микротвердость и самую высокую износостойкость. Использование КПЭ позволяет получать композитную металлическую матрицу с особо развитой микроструктурой, микротвердостью и трибологическими свойствами, чем покрытия, полученные с помощью традиционных методов обработки.

2. Постановка задачи

Анализируя, литературные данные можно сказать, что в настоящее время для упрочнения поверхностных слоев широко используют концентрированные потоки энергии, в частности, метод вакуумной электронно-лучевой обработки. В качестве упрочняющих покрытий широко используют композиции на основе порошка стали 10P6M5, или спёков данного порошка с карбидами W, Ti, V. Данные покрытия хорошо себя зарекомендовали в условиях абразивного воздействия, обеспечивая минимальный износ.

Однако в парах трения, где основная нагрузка сосредоточена на пятнах контакта, значения давления и температуры значительно превосходят номинальные. Это приводит к развитию интенсивной пластической деформации на пятнах контакта, передеформации и, как следствие, формированию трещин и выкрашиванию целых объемов материала покрытия. Так для покрытий на основе стали 10P6M5 [22] выявлена область катастрофического изнашивания при скоростях скольжения 2,4 и 3,6 м/с в интервале нагрузок 40...60 Н (рис. 1).

Для обеспечения равномерной интенсивности изнашивания в широком интервале скоростей скольжения и нагрузок и сохранения ее на минимальном уровне можно предложить ряд подходов. **Первый из них** реализован за счет наплавки композиционного покрытия «сталь 10P6M5+20% WC» [22]. В этом случае сильно усложняется технология подготовки композиционного порошка: необходимы дополнительные операции по смешиванию исходных компонентов, их спеку в вакуумной среде, размолу полученных спеков и последующему их рассеву на фракции. В данной работе предлагается **второй** более экономичный вариант – дополнительное дискретное оплавление сформированного покрытия электронным лучом в одном технологическом цикле: рафинирование – наплавка – оплавление. При этом используется промышленный порошок стали 10P6M5.

В зависимости от структуры объемов материала дискретных точек обработки и основным покрытием, пятна контакта могут формироваться на тех или других объёмах материала. Оставшиеся более мягкие участки покрытия будут исполнять роль релаксации напряжений, и тормозить развитие трещин, формирующихся в пятнах контакта.

Цель работы: особенности формирования структуры в зоне оплавления и зоне термического влияния композиционного покрытия на основе стали 10P6M5 в ходе вакуумного импульсного электронного воздействия в интервале тока луча 40...95 мА.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

- наплавить композиционные покрытия на основе стали 10P6M5 электронным лучом в вакууме;
- оплавить наплавленные покрытия импульсным источником электронов с линейной разверткой в вакууме в широком интервале тока луча (40, 44, 50, 56, 64, 71, 78, 86, 95 мА);
- изучить структуру оплавленных зон и ЗТВ в двух плоскостях: параллельно и перпендикулярно оси пучка. Построить распределения микротвердости в радиальном направлении приосевой части пучка и в областях между смежными зонами оплавления в сечении образца перпендикулярном поверхности воздействия;
- на основе анализа совокупности полученных данных обосновать наиболее рациональный режим обработки импульсным электронным лучом ранее наплавленного покрытия для дальнейшей реализации его в парах трения с высокими контактными нагрузками.

3. Материалы, оборудование и методы исследования

В работе в качестве основного металла (подложки) использовали образцы стали 30 (химический состав стали (вес. %): С 0,27...0,35; Si 0,17...0,37; Mn 0,5...0,8; Ni до 0,25; S до 0,04; P до 0,035; Cr до 0,25; Cu до 0,25; As до 0,08; Fe основа), размером 50×100 мм и толщиной 5 мм. Перед наплавкой образцы предварительно подогревали до температур 450...500 °С для рафинирования упрочняемой поверхности. Далее производилась наплавка композиционного покрытия на основе порошка стали 10P6M5 (вес. %, С 1; Cr 4; W 6,5; Мо 5; V 2; Si до 0,5; Mn 0,55; Ni0,4; S 0,03) электронным лучом в вакууме. Скорость движения образца во время наплавки была 3 мм/с и ускоряющее напряжение 27 кВ. Общая толщина наплавленного слоя 4 мм формировалась за 5 проходов. Перед оплавлением покрытий производилось их плоское шлифование и полирование на алмазных пастах разной дисперсности. Оплавление осуществлялось импульсным источником электронов в вакууме в виде дискретных линейных зон, как показано на рисунке 2. Параметры данного режима: ускоряющее напряжение 30 кВ; время импульса 100 мс; шаг луча 2 мм; частота развертки 100 Гц; длина развертки луча 20 мм; частота повторения импульсов 1 Гц; ток луча в импульсе 40, 44, 50, 56, 64, 71, 78, 86 и 95 мА.

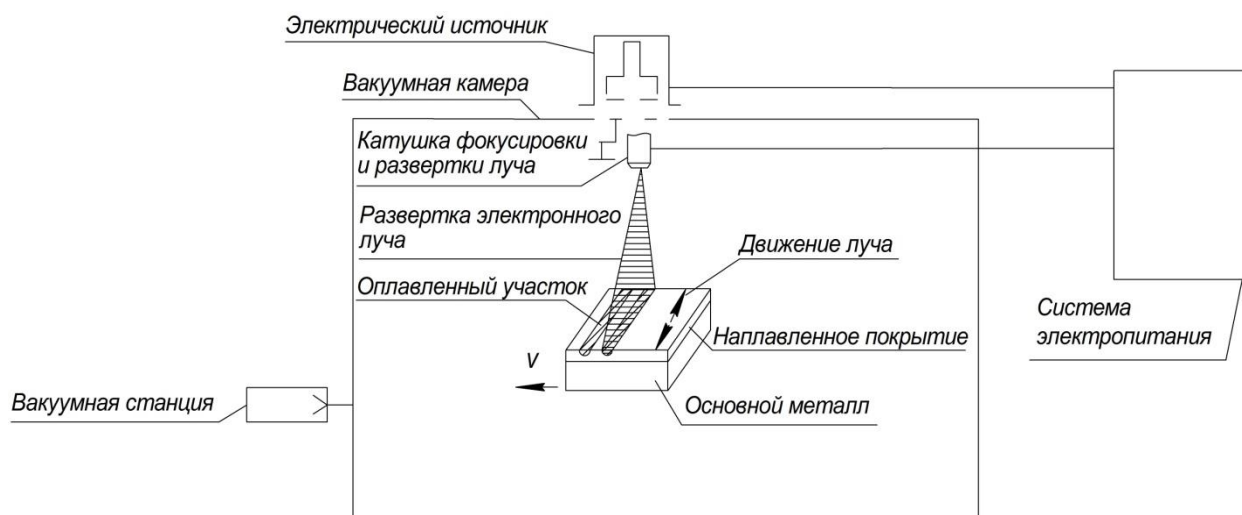


Рисунок 2 – Схема установки для оплавления ранее наплавленного покрытия импульсным источником электронов в вакууме

Микроструктуру наплавленного материала и оплавленных зон исследовали в двух плоскостях: параллельно и перпендикулярно оси пучка. Для этого из исходных массивных заготовок вырезались образцы с помощью электроэрозионного станка. Далее исследуемые плоскости шлифовались и полировались с использованием абразива различной дисперсности. Для выявления структуры покрытия и оплавленных зон использовали химическое травление шлифов в смеси кислоты 4% HNO_3 методом погружения в течение 60...90 с. Анализ микроструктуры осуществлялся с помощью оптической металлографии (ОМ) на микроскопе Olympus GX 51 с комплектом прикладных программ SIAMS 700.

Микротвердость (HV) образцов измеряли на приборе ПМТ-3 на поперечных шлифах с шагом по глубине 100 мкм при нагрузке 0,981 Н по двум вертикальным линиям (1 и 2) и одной горизонтальной линии (3) как показано на схеме (рис. 3).

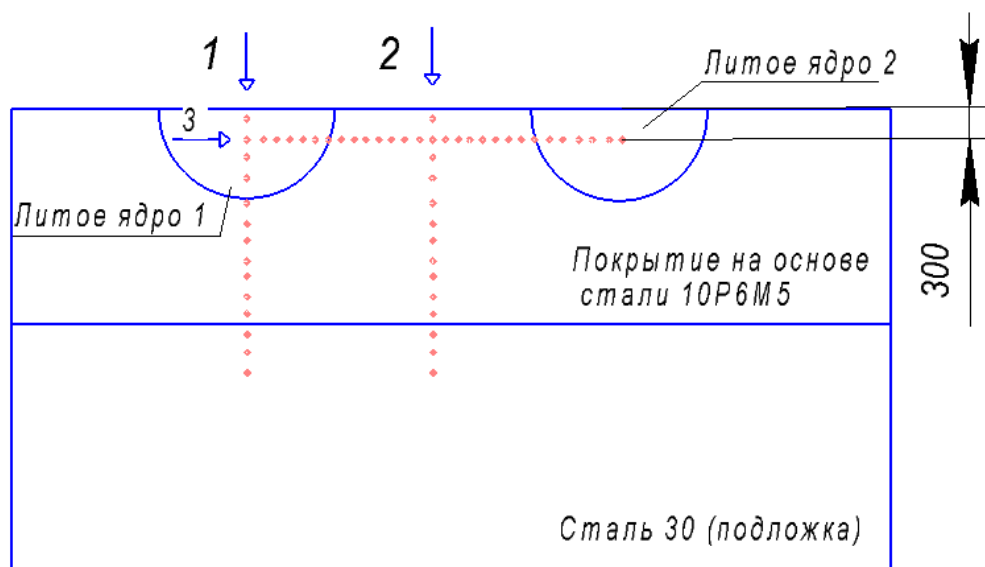


Рисунок 3 – Схема замера микротвердости по линиям 1, 2 и 3

4. Экспериментальная часть

На рисунке 4 представлена микроструктура исходного покрытия на основе стали 10P6M5, полученного электронно-лучевой наплавкой в вакууме. Данное покрытие было сформировано за 5 проходов электронного луча. Общая толщина покрытия составила 4 мм. Ранее проведенный в работе [22] анализ данной микроструктуры показал, что она состоит из аустенитно-мартенситной матрицы с размером первичного зерна аустенита 6 мкм и эвтектическими карбидами по границам зерен в виде сетки. При данном виде наплавки оптической микроскопией иглы мартенсита не выявляются. В литературе такой мартенсит называется бесструктурный или скрытоигольчатый. В карбидной подсистеме формируются: эвтектический карбид на основе M_6C , расположенный в виде сетки по границам зерен, равноосные частицы карбида ванадия, расположенные как по границам зерен, так и внутри зерна, и вторичные дисперсные карбиды внутри зерна на основе карбида типа M_6C . По данным рентгеноструктурного анализа объемная доля мартенсита от общего объема матрицы в покрытии составляет ~70%.

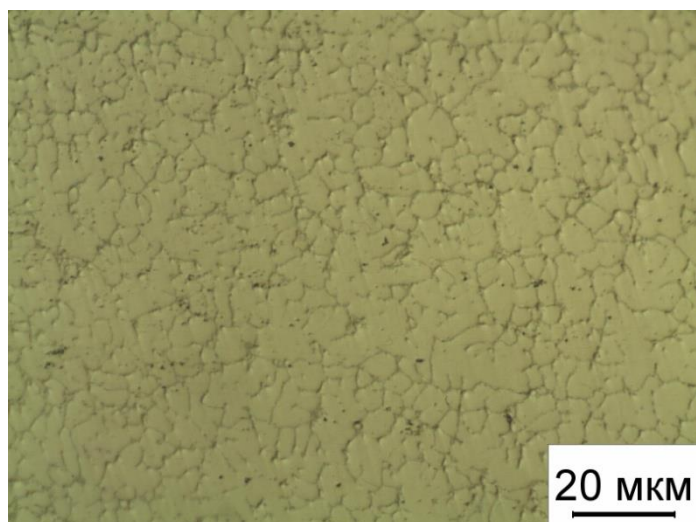


Рисунок 4 – Микроструктура исходного покрытия на основе стали 10P6M5

В ходе импульсного электронно-лучевого оплавления в исходном покрытии формируется дорожка оплавления (в поперечном сечении представляющая собой литое ядро) в структуре которой, явно выделяются две

области с разной степенью травимости (светлая и темная), (рис.5). Темный участок состоит из дисперсной ячеистой структуры, в которой равномерно распределены равноосные выделения второй фазы (рис. 6 а). Темный участок всегда находится в верхней части литого ядра. Светлая составляющая литого ядра представляет собой только ячеистую структуру, размер кристаллитов которой на порядок больше, чем в темном участке. Деление литого ядра на светлую и темную структурные составляющие, наблюдается только при увеличении тока луча от 40 до 50 мА. Объемные соотношения между этими двумя структурными составляющими не зависят от тока луча в указанном диапазоне и находится на уровне 30 (темная) / 70 (светлая). Далее с увеличением тока луча в литом ядре фиксируется только светлая составляющая (рис. 6 б). Судя из анализа микротвердости (рис. 7 а-в) слабая травимость литого ядра в указанном интервале тока (44...50 мА) обусловлена наличием большого количества остаточного аустенита. Это обусловлено значительным растворением легирующих элементов в γ - твердом растворе входящих в состав эвтектического карбида и карбида ванадия, что понижает температуру начала мартенситного превращения. Далее с увеличением тока луча объёмная доля литого ядра (дорожки оплавления) увеличивается (рис. 5 б, в) и, следовательно, скорость кристаллизации и последующего охлаждения уменьшается. Это способствует увеличению количества карбидной фазы в литом ядре и, следовательно, способности аустенита к мартенситному $\gamma \rightarrow \alpha$ превращению. Увеличение объемной доли карбидной фазы (эвтектического карбида типа M_6C) хорошо видно по анализу увеличения толщины границ зерен (рис. 6 б). Размер кристаллитов аустенита (4 мкм) значительно больше, чем при меньшем токе луча (<1.5 мкм). При этом твердость в литом ядре повышается до исходного значения, характерного для наплавленного металла, (рис. 7 г-з). Слабая травимость литого ядра при токе луча выше 50 мА сохраняется, но уже по причине образования дисперсного (скрытоигольчатого) мартенсита.

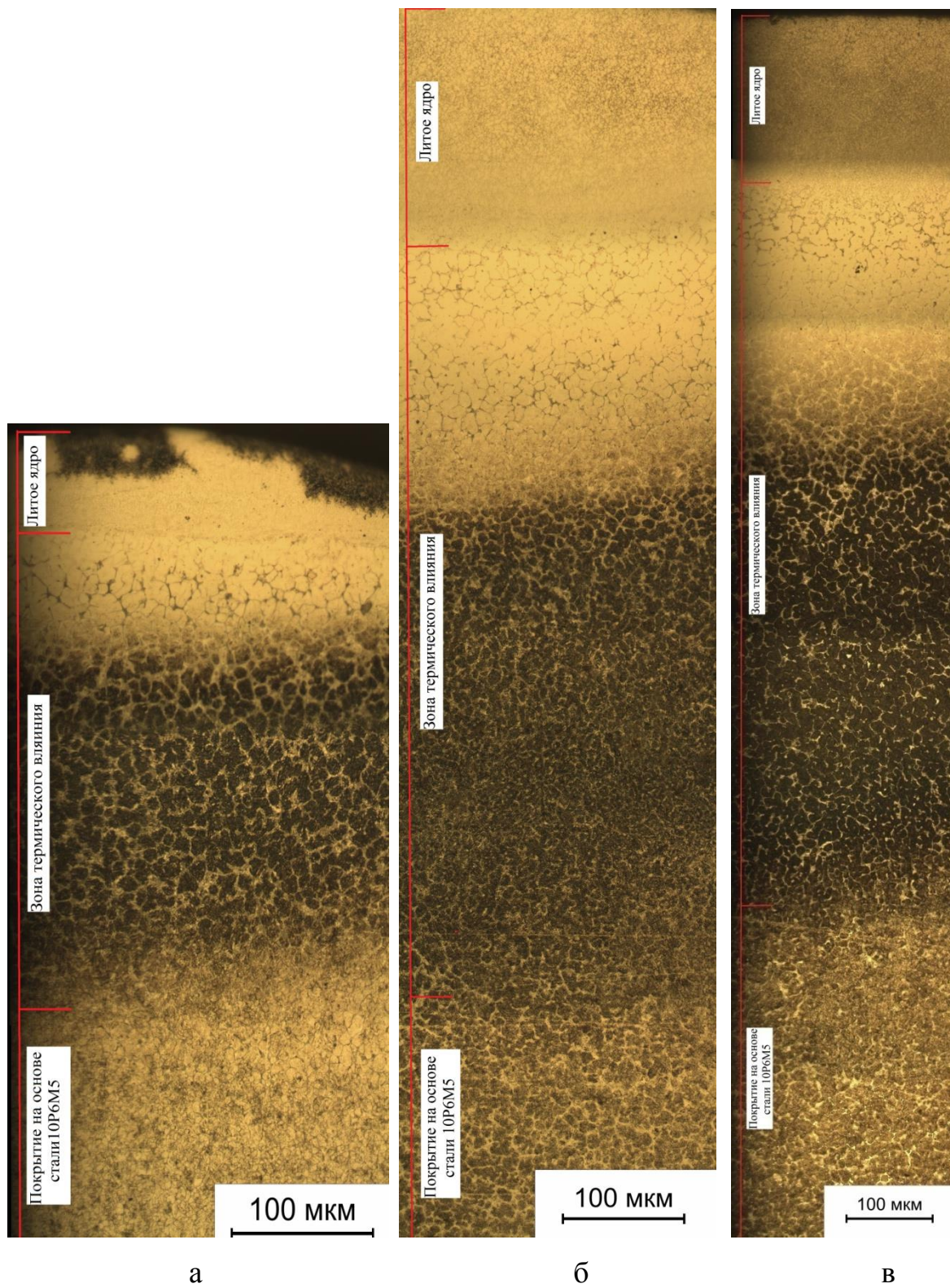
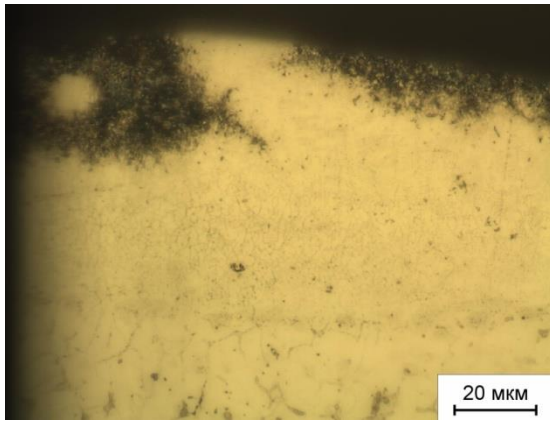
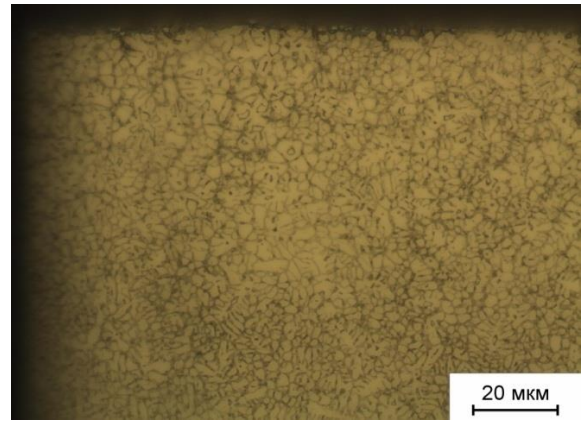


Рисунок 5 – Микроструктура покрытия после импульсного электронно-лучевого оплавления; ток луча: (а) 44; (б) 78; (в) 95 мА

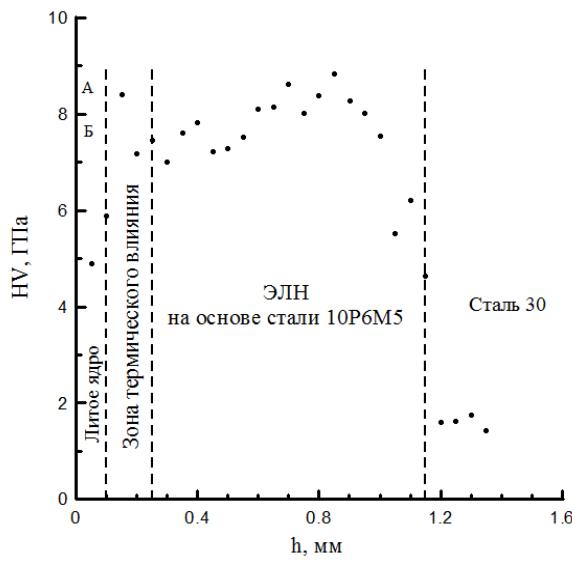


а

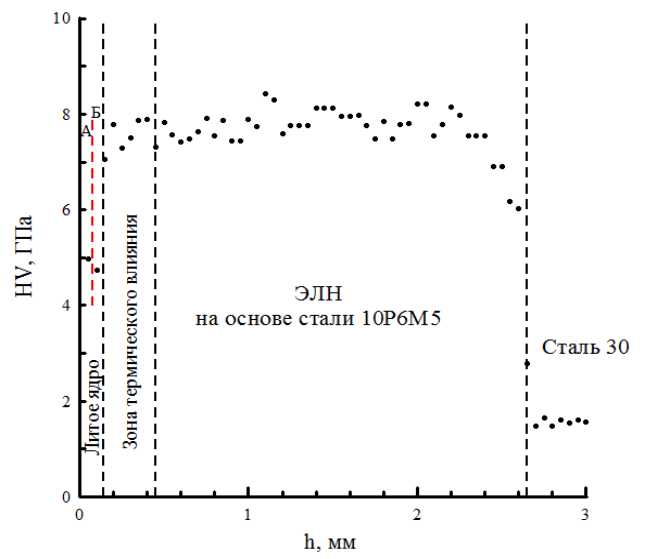


б

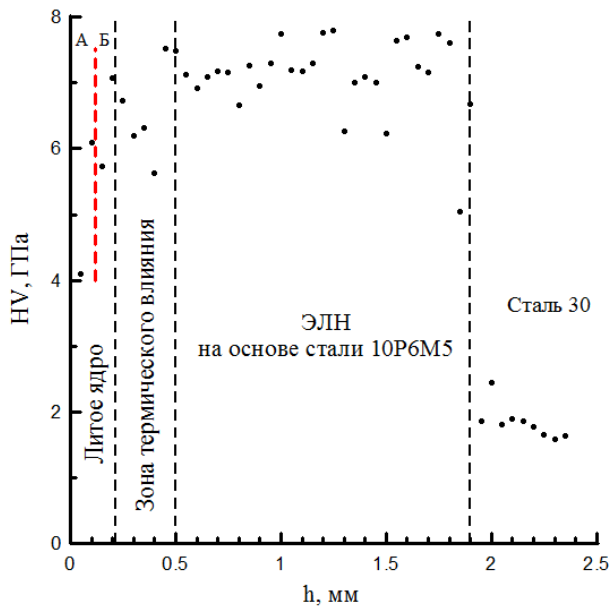
Рисунок 6 – Микроструктура литого ядра при токе луча: (а) 44; (б) 95 мА



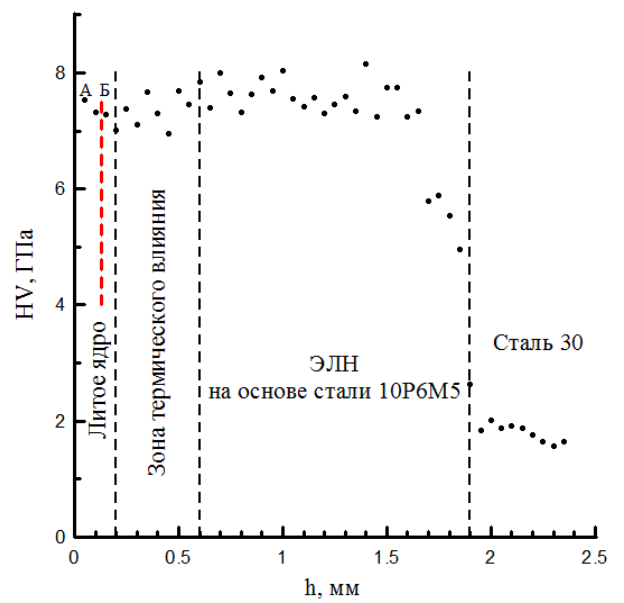
а



б



в



г

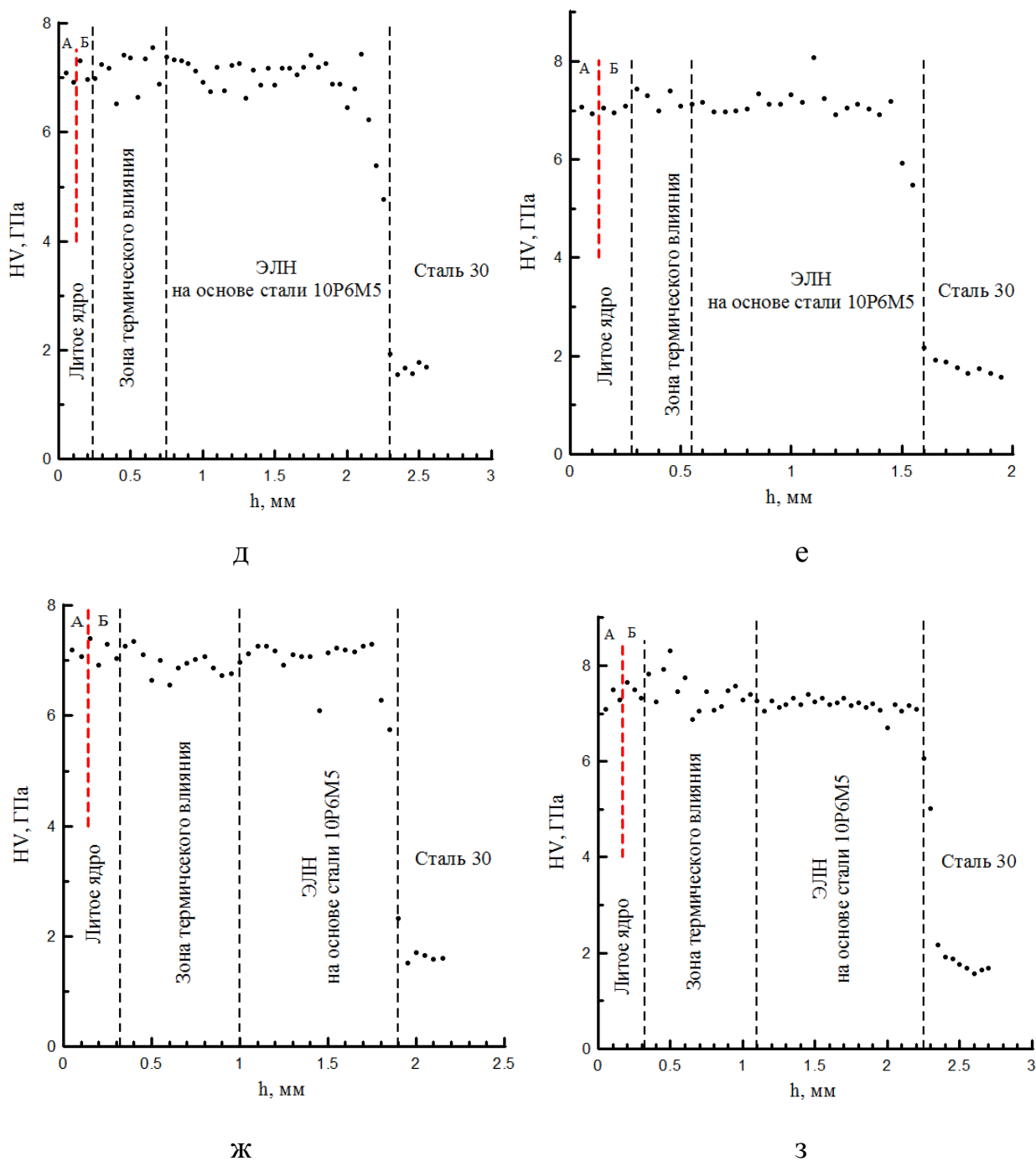
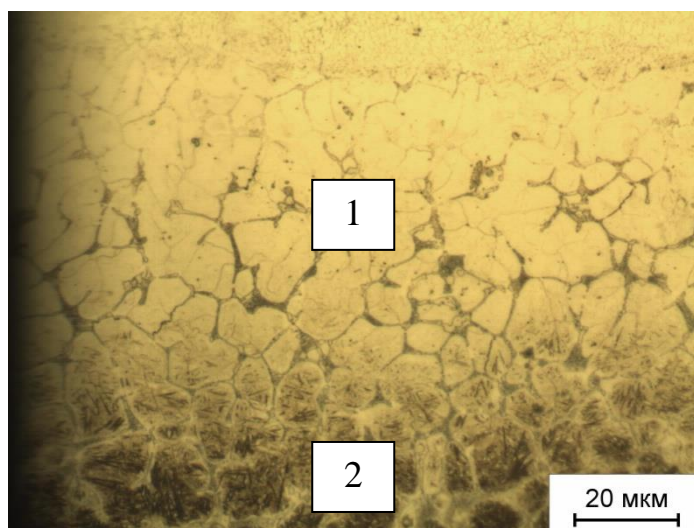


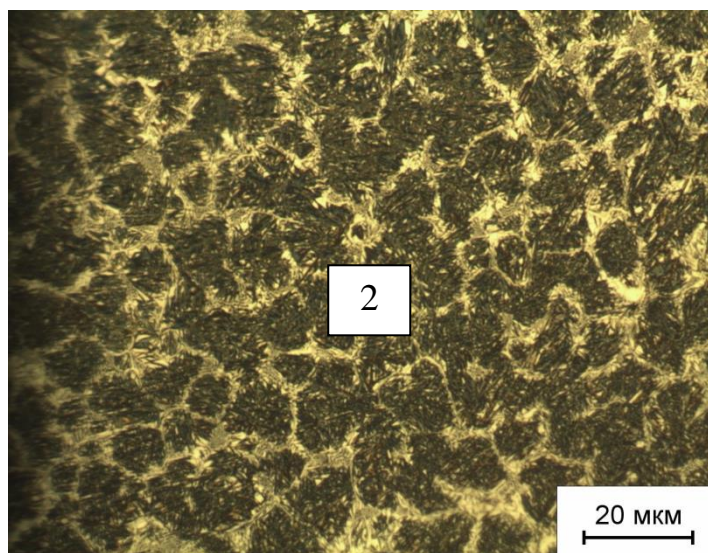
Рисунок 7 – Изменение микротвердости образцов по толщине покрытия после импульсной электронно-лучевой обработки; ток луча: 40 (а); 44 (б); 50 (в); 64 (г); 71 (д); 78 (е); 86 (ж); 95мА (з)

С увеличением тока луча происходит увеличение размеров и протяженности не только литого ядра, но ЗТВ, в которой независимо от тока луча можно выделить два участка с различной степенью травимости и, следовательно, структурой (рис. 5).

В объеме участка 1 явно просматривается более грубая структура кристаллитов аустенита по сравнению с участком 2 (рис. 8). Это связано с более высокой температурой, до которой нагревался участок 1 (в традиционном понимании ЗТВ сварных соединений, данный участок можно отнести к участку перегрева). Эвтектика на основе карбида M_6C как более легкоплавкая (1350...1450°C [34]) расплавлялась по границам аустенитного зерна и вольфрам, и углерод частично растворялись в γ -твердом растворе. Последующее охлаждение приводило к повторной ее кристаллизации, однако за счет частичного растворения в аустените, объемная доля эвтектики значительно уменьшилась. Это хорошо видно при анализе ширины эвтектических колоний на участке 1 (рис. 7 а) и на участке 2 (рис. 7 б). Дополнительное растворение легирующих элементов в аустените способствовало уменьшению температуры начала мартенситного превращения и, следовательно, увеличению объемной доли аустенита в этом участке. С другой стороны, скрытоигольчатый мартенсит для данных покрытий подвергается слабой травимости, как это хорошо видно в исходном покрытии (рис 4). Степень превращения аустенита в мартенсит можно оценить по величине микротвердости этих участков ЗТВ.



а



б

Рисунок 8 – Микроструктура ЗТВ: светлого участка (а); темного участка (б)

Структура участка 2 ЗТВ свидетельствует о высокой доле мартенсита в объеме кристаллитов матрицы (рис. 8 б). Судя по размерам его можно отнести к мелкоигольчатой морфологии. Ширина колоний эвтектики по границам зерен значительно превосходит размеры эвтектики исходного покрытия (см. рис. 1 и рис. 8 б). Это в полной мере относится и к оценке размеров первичного зерна аустенита.

Микротвердость в ЗТВ остается практически на уровне основного покрытия $\sim 7...7,5$ ГПа (рис 7 а-з). Разброс микротвердости обусловлен тем, что структура ЗТВ участка 1 более грубая, а в объеме металла участка 2 просматриваются иглы мартенсита с широкими эвтектическими колониями, по сравнению со структурой исходного покрытия. Аналогичные колебания в значениях микротвердости ЗТВ характерны и при анализе профилей HV, построенных по линии 2 (см. рис.3). Это обусловлено структурой ЗТВ которая была описана выше и ничем не отличается от таковой при ее анализе по линии 2. Главным результатом исследования структуры по линии 2 является установления тока луча, при котором наступает перекрытие зон термического влияния от двух соседних дорожек оплавления: при токе луча 78 мА (рис. 9, 10).

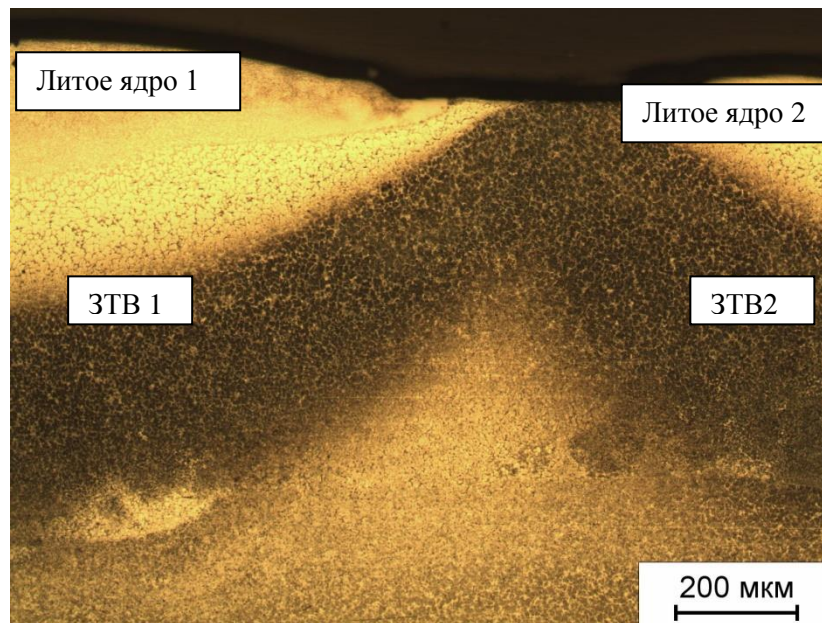
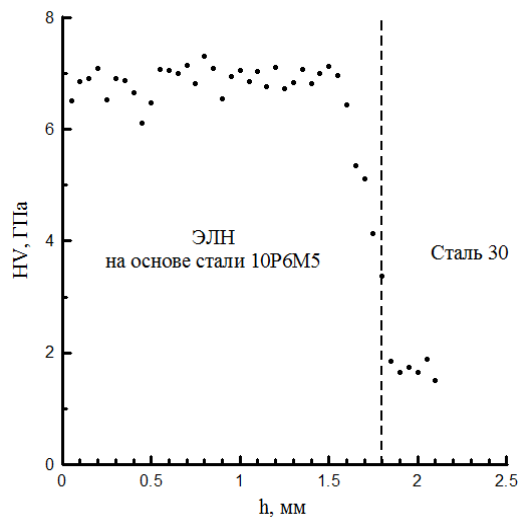
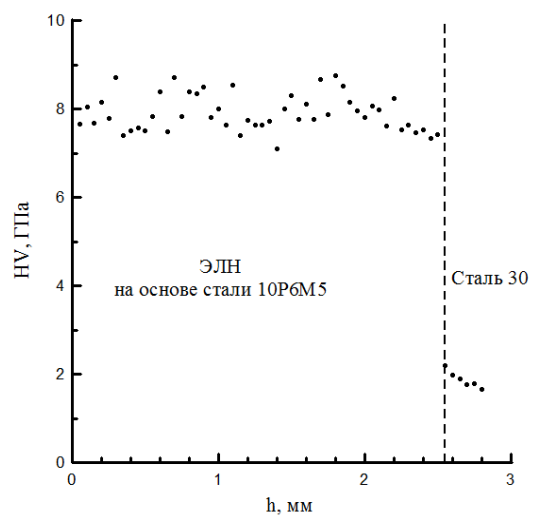


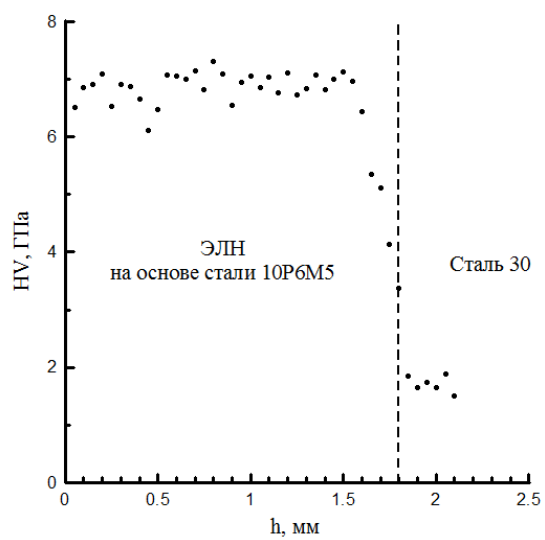
Рисунок 9 – Структура покрытия в области двух смежных дорожек оплавления при токе луча 78 мА



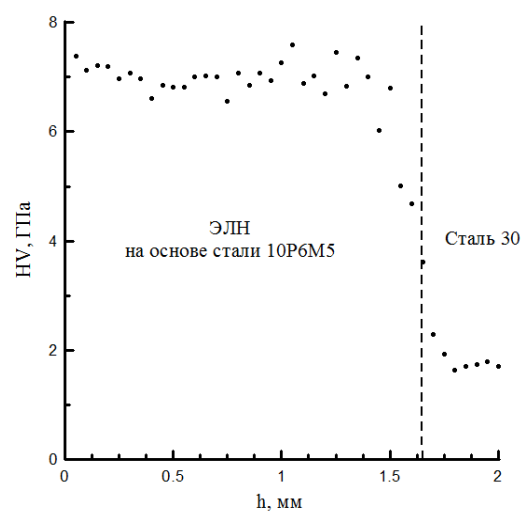
а



б



в



г

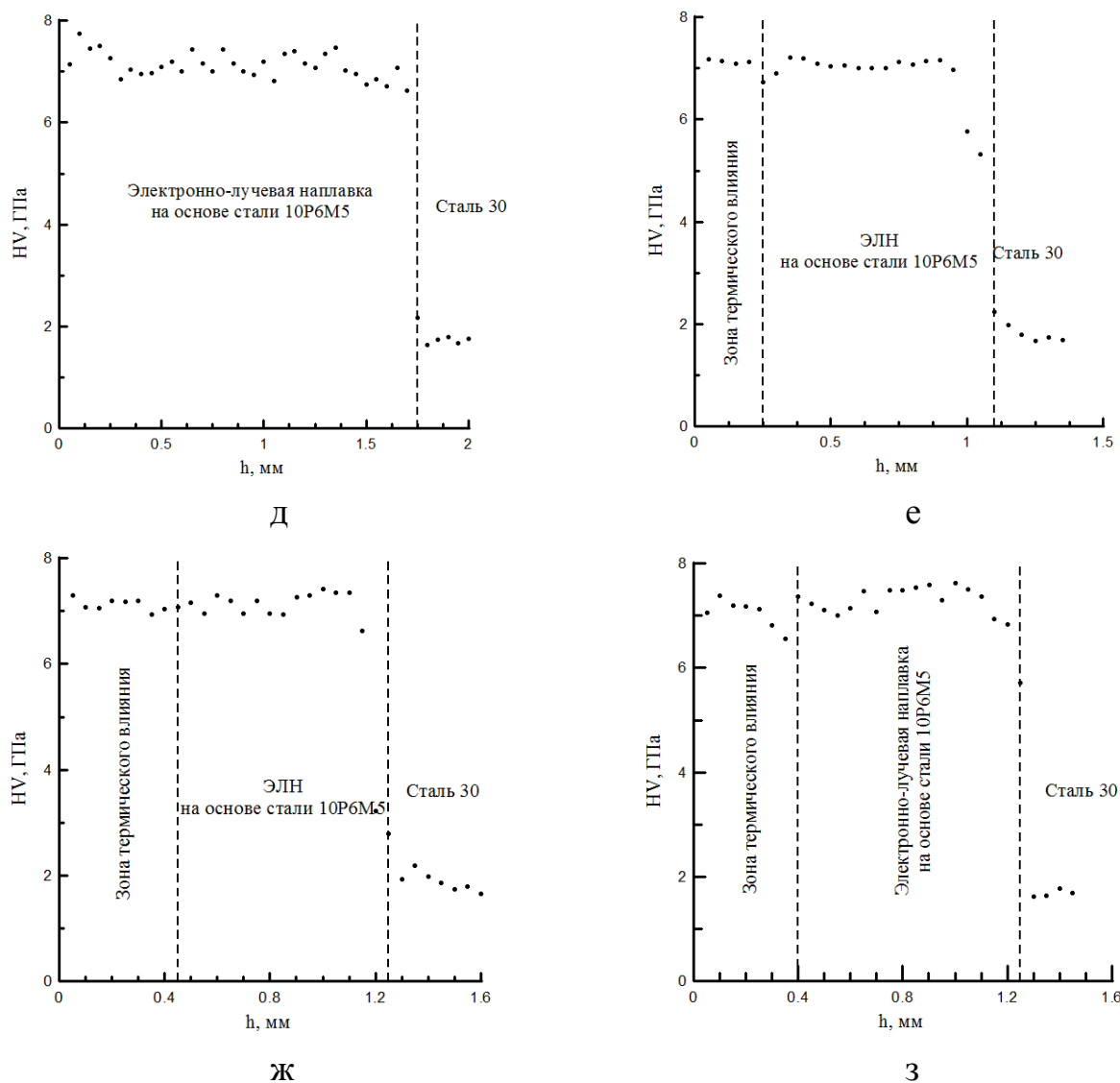
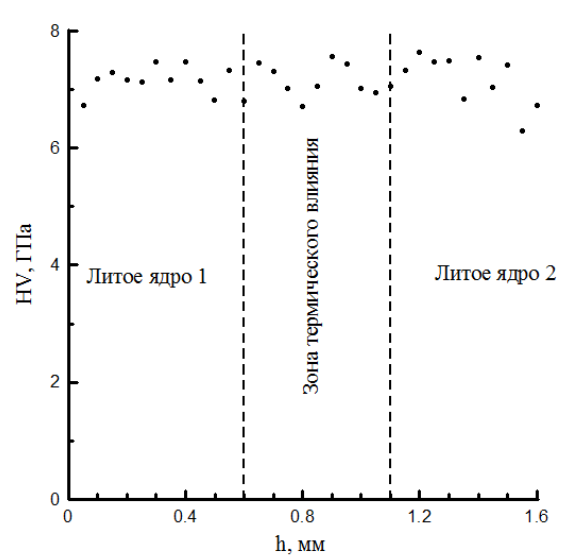
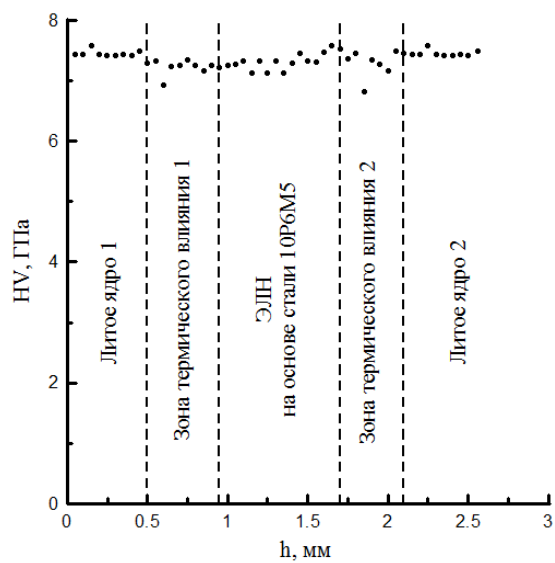
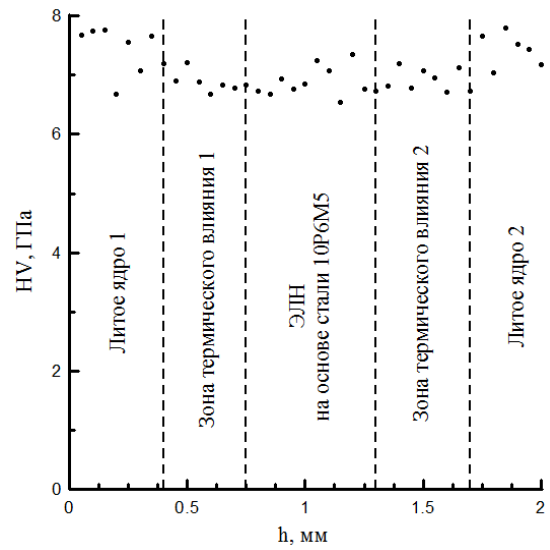
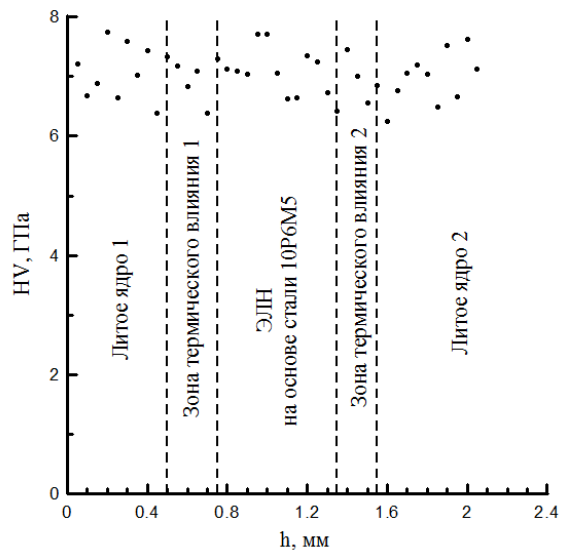
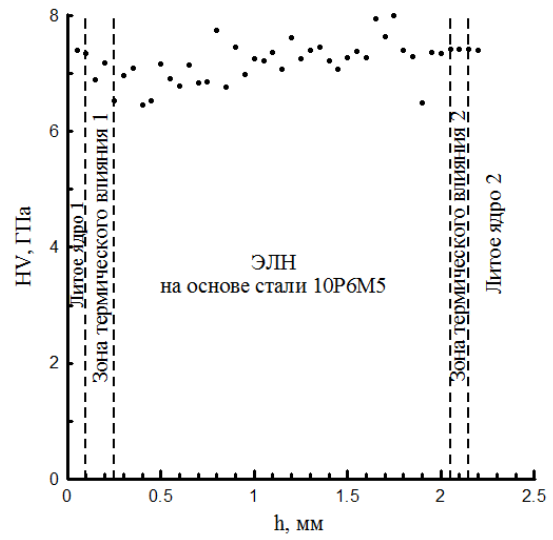
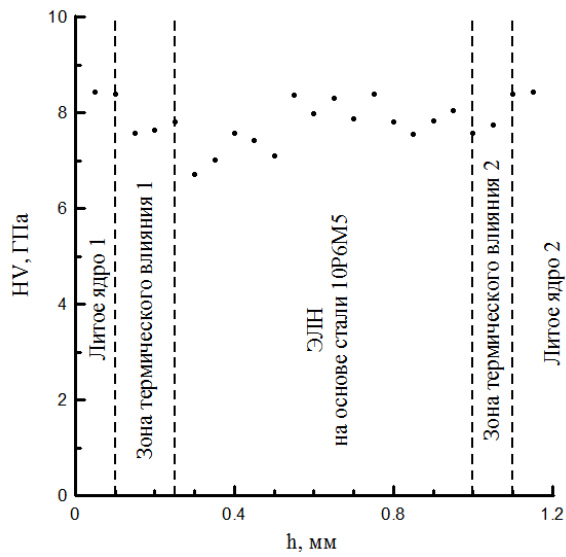


Рисунок 10 – Профилограммы изменения микротвердости по линии 2 (см. рис. 3); ток луча: (а) 40; (б) 44; (в) 50; (г) 64; (д) 71; (е) 78; (ж) 86; (з) 95 мА

Анализируя, микроструктуру ОМ, ЗТВ и микротвердость по линии перпендикулярной оси пучка на расстоянии 300 мкм от поверхности оплавления можно говорить о том, что микроструктура ЗТВ ни чем не отличается от структуры ЗТВ изученной по оси пучка и микротвердость остается на уровне микротвердости основного покрытия (рис. 11). С увеличением тока луча происходит увеличение ширины ЗТВ ее сближение при токе луча 64 мА, а само перекрытие происходит при токе луча 78 мА.



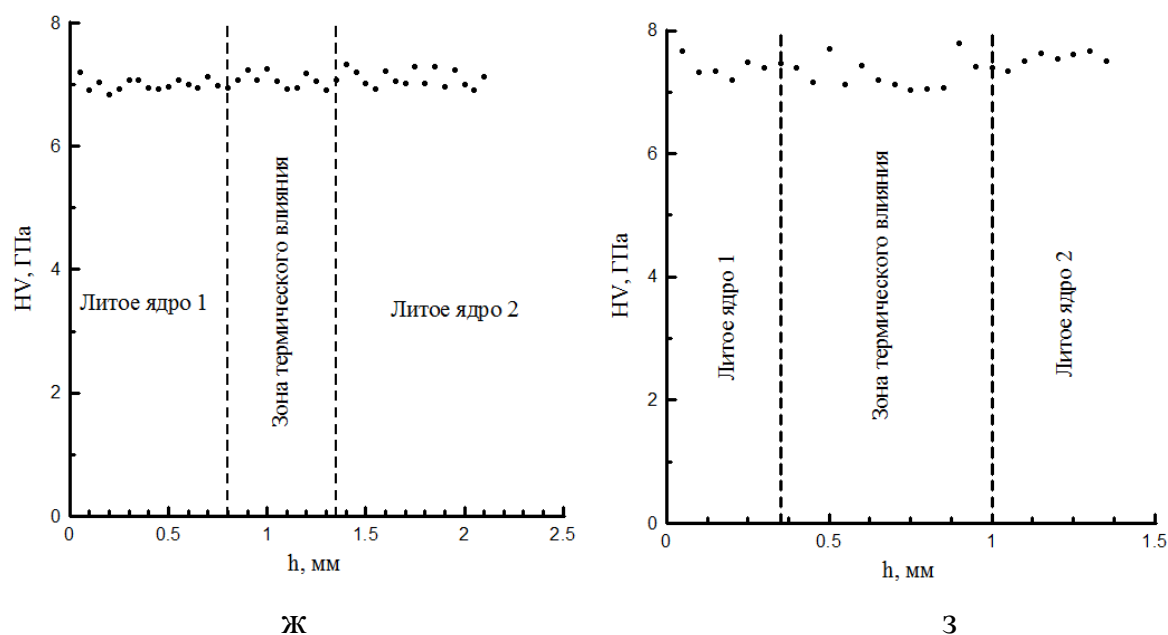
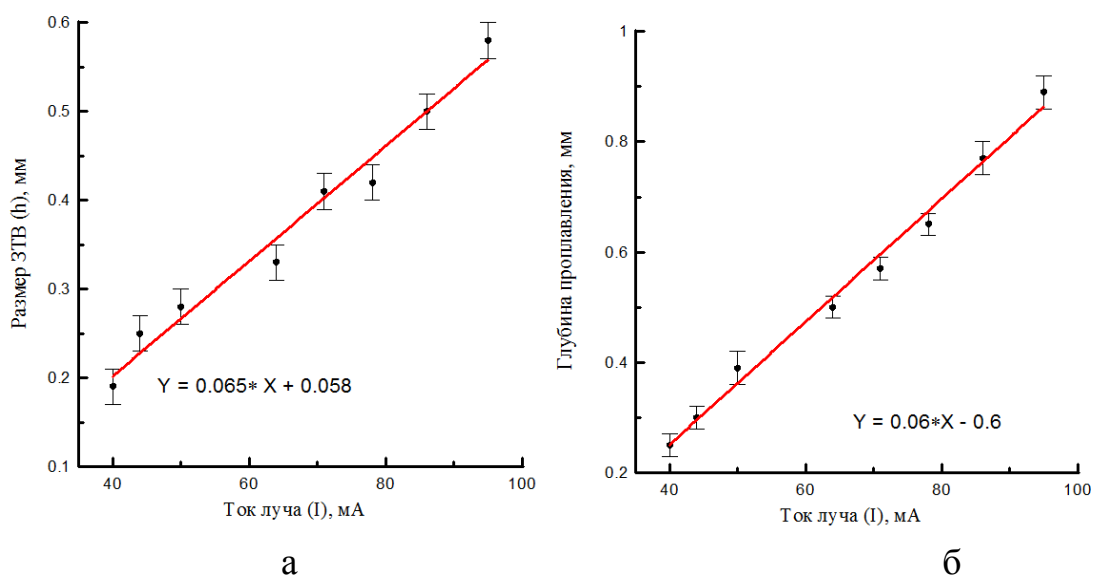


Рисунок 11 – Профилограммы изменения микротвердости по линии 3 (см. рис 3); ток луча: (а) 40; (б) 44; (в) 50; (г) 64; (д) 71; (е) 78; (ж) 86; (з) 95 мА

Анализируя, весь комплекс полученных результатов установлено (рис. 12) можно сказать, что с увеличением тока луча происходит увеличение ширины ЗТВ измеренной как по оси пучка (а), так и перпендикулярно ему (г), глубины проплавления (б), ширины оплавленного участка (в). Данные зависимости близки к линейному закону. При токе луча меньше 71 мА не происходит перекрытия зон термического влияния от соседних дорожек оплавления (рис. 12 г), в противном случае происходит перекрытие данных зон (рис. 9).



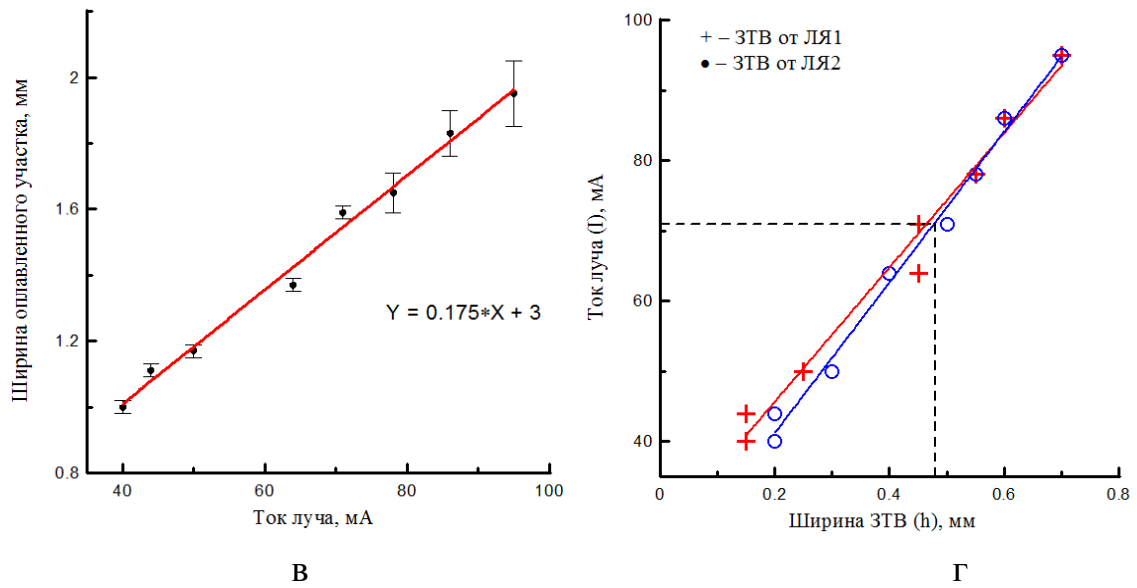


Рисунок 12 – Зависимость размера ЗТВ (а), глубины проплавления (б), ширины оплавленного участка (в) и ширины ЗТВ (г) от тока луча

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Fast - анализ

В качестве объекта исследования выбран микротвердомер ПМТ-3М, так как с помощью него производились основные измерения микротвердости.

5.1 Описание главных, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом

Таблица 1-Классификация функций, выполняемых объектом

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
1.Основание	1	Обеспечение устойчивости микротвердомера			X
2.Колонна	1	Обеспечивает перемещение кронштейна и тубуса		X	
3.Гайка	1	Обеспечивает передвижение кронштейна и тубуса			X
4.Зажимной винт	1	Обеспечивает крепление кронштейна			X
5.Барашек грубого движения	1	Обеспечивает грубое движение тубуса		X	
6.Барашек микрометрического движения	1	Обеспечивает микрометрическое движение тубуса		X	
7.Рукоятка	1	Обеспечивает стопорение грубого движения тубуса			X
8.Барашек	1	Определяет высоту			X

9.Предметный столик	1	Обеспечивает установку рассматриваемого образца		X	
10.Винт	1	Обеспечивает перемещение в двух взаимноперпендикулярных плоскостях столика			X
11.Стопорный винт	1	Обеспечивает стопорение столика			X
12.Рукоятка	1	Обеспечивает поворот столика			X
13.Призма	1	Обеспечивает исследование поверхностей цилиндрических предметов		X	
14.Пластина	1	Обеспечивает поместить предмет любой конфигурации		X	
15.Механизм нагружения (шток)	1	Обеспечивает необходимое нагружение		X	
16.Оправка с алмазной пирамидой	1	Обеспечивает нанесение укола на исследуемый объект	X		
17.Гирька	1	Обеспечивает необходимое усилие		X	
18.Рукоятка арретира	1	Обеспечивает опускание штока	X		
19.Осветитель	1	Обеспечивает освещение исследуемого предмета	X		
20.Светофильтры	1	Обеспечивают контрастность исследуемого предмета		X	
21.Трансформатор	1	Обеспечивает питание	X		
22.Винтовой окуляр-микрометр	1	Обеспечивает наблюдение исследуемого предмета	X		

5.2 Определение значимости выполняемых функций объектом

Таблица 2 - Матрица смежности

	Осно- вание	Колон- на	Гайка	Зажим- ной винт	Бара- шек грубо- го дви- жения	Бара- шек микро- метри- ческо- го дви- жен	Рукоят -ка
Основание	=	>	>	>	<	<	>
Колонна	<	=	>	>	<	<	>
Гайка	<	<	=	<	<	<	<
Зажимной винт	<	<	>	=	<	<	>
Барашек грубого движения	>	>	>	>	=	<	>
Барашек микрометр ического движения	>	>	>	>	>	=	>
Рукоятка	<	<	>	<	<	<	=

Продолжение таблицы 2

	Бара- шек	Пред- мет- ный сто- лик	Винт	Сто- пор- ный винт	Руко- ятка	Приз- ма	Плас- тина
Барашек	=	<	>	>	>	<	>
Предмет - ный столик	>	=	>	>	>	<	>
Винт	<	<	=	<	<	<	>
Стопорны й винт	<	<	>	=	>	<	>
Рукоятка	<	<	>	>	=	<	>
Призма	>	>	>	>	>	=	>
Пластина	<	<	>	<	<	<	=

Продолжение таблицы 2

	Механизм нагружения (шток)	Оправка с алмазной пирамидой	Гирька	Рукоятка арретира	Осветитель	Светофильтры	Трансформатор	Винтовой окуляр-микроскоп
Механизм нагружения (шток)	=	<	>	>	<	>	<	<
Оправка с алмазной пирамидой	>	=	>	>	>	>	<	<
Гирька	<	<	=	<	<	>	<	<
Рукоятка арретира	<	<	<	=	<	>	<	<
Осветитель	>	<	>	>	=	>	<	<
Светофильтры	<	<	<	<	<	=	<	<
Трансформатор	>	>	>	>	>	>	=	>
Винтовой окуляр-микроскоп	>	>	>	>	>	>	<	=

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

Преобразовываем матрицы смежности в матрицы количественных соотношений функций.

Таблица 3 - матрица количественных соотношений функций

	Осно- вание	Колон- на	Гайка	Зажим- ной винт	Бара- шек грубо- го движе- ния	Бара- шек микро- метри- ческого движен- ия	Руко- ятка	Итого	
Основание	1	1,5	1,5	1,5	0,5	0,5	1,5	8	0,16
Колонна	0,5	1	1,5	1,5	0,5	0,5	1,5	7	0,14
Гайка	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1,5	5	0,1
Зажимной винт	0,5	0,5	1,5	1	0,5	0,5	1,5	6	0,12
Барашек грубого движения	1,5	1,5	1,5	1,5	1	0,5	1,5	9	0,18
Барашек микрометр ического движения	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1,5	10	0,2
Рукоятка	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	0,5	1	5	0,1
								$\Sigma=$ 50	$\Sigma=$ 1

Продолжение таблицы 3

	Бара-шек	Пред-мет-ный столик	Винт	Стопор-ный винт	Руко-ятка	Призма	Плас-тина	Итого	
Барашек	1	0,5	1,5	1,5	1,5	0,5	1,5	8,5	0,17
Предмет - ный столик	1,5	1	1,5	1,5	1,5	0,5	1,5	9	0,18
Винт	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1,5	5	0,1
Стопорны й винт	0,5	0,5	1,5	1	1,5	0,5	1,5	7	0,14
Рукоятка	0,5	0,5	1,5	1,5	1	0,5	1,5	7	0,14
Призма	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1,5	9,5	0,19
Пластина	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	4	0,08
								$\Sigma=50$	$\Sigma=1$

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

Продолжение таблицы 3

	Меха-низм наг-ружения (шток)	Оправка с алмаз-ной пирами-дой	Гирь-ка	Рукоят-ка аррет и-ра	Освети-тель	Свето-фильт-ры	Транс-форматор	Винто-вой окуляр-метр
Механизм наг-ружения (шток)	1	0,5	1,5	1,5	0,5	1,5	0,5	0,5
Оправка с алмазной пирамидой	1,5	1	1,5	1,5	1,5	1,5	0,5	0,5
Гирька	0,5	0,5	1	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5
Рукоятка арретира	0,5	0,5	0,5	1	0,5	1,5	0,5	0,5
Освети-тель	1,5	0,5	1,5	1,5	1	1,5	0,5	0,5
Свето-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5

фильтры								
Трансформатор	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1,5
Винтовой окуляр-микрометр	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	0,5	1

Продолжение таблицы 3

	Итого	
Механизм нагружения (шток)	8,5	0,14
Оправка с алмазной пирамидой	9,5	0,16
Гирька	5,5	0,09
Рукоятка арретира	5,5	0,09
Осветитель	8,5	0,14
Светофильтры	5,5	0,09
Трансформатор	11,5	0,19
Винтовой окуляр-микрометр	10,5	0,17
	$\Sigma=60,5$	$\Sigma=1$

5.3 Определение значимости функций

Определяем значимость функций путем деления балла, полученного по каждой функции, на общую сумму баллов по всем функциям. Так, для основания $8/50=0,16$; колонны $7/50=0,14$; $5/50=0,1$; зажимного винта $6/50=0,12$; барашка грубого движения $9/50=0,18$; барашка микрометрического движения $10/50=0,2$; рукоятки $5/50=0,1$; барашка $8,5/50=0,17$; предметного столика $9/50=0,18$; винта $5/50=0,1$; стопорного винта $7/50=0,14$; рукоятки $7/50=0,14$; призмы $9,5/50=0,19$; пластины $4/50=0,08$; механизма нагружения (шток) $8,5/50=0,17$; оправки с алмазной пирамидой $9,5/50=0,19$; гирьки $5,5/50=0,11$; рукоятки арретира $5,5/50=0,11$; осветителя $8,5/50=0,17$; светофильтров $5,5/50=0,11$; трансформатора $11,5/50=0,23$; винтового окуляр-микрометра $10,5/50=0,21$.

5.4 Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Таблица 4 - Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Норма расхода, кг	Трудо-емкость детали, нормо-ч	Стоимость материала, руб.	Заработная плата, руб.	Себестоимость, руб.	Итого	
Основание	1	Обеспечение устойчивости микротвердомера	0,21	0,2	34,6	27,4	40,1	102,1	0,03
Колонна	1	Обеспечивает перемещение кронштейна и тубуса	2	1,75	80,2	80,1	88	248,3	0,07
Гайка	1	Обеспечивает передвижение кронштейна и тубуса	0,67	0,9	73,6	25,5	75,8	174,6	0,05
Зажимной винт	1	Обеспечивает крепление кронштейна	0,78	0,34	67,1	24,7	69,2	161	0,05
Барашек грубого движения	1	Обеспечивает грубое движение тубуса	0,82	0,87	70,5	27,7	76,8	175	0,55
Барашек микрометрического движения	1	Обеспечивает микрометрическое движение тубуса	0,9	0,78	74,3	29	79,9	183,2	0,057
Рукоятка	1	Обеспечивает стопорение грубого движения тубуса	0,32	0,45	50,8	22,7	55,7	129,2	0,04
Барашек	1	Определяет высоту	0,25	0,5	45,1	26,7	48,9	120,7	0,038
Предметный столик	1	Обеспечивает установку рассматриваемого образца	1	1	50,2	29,7	55,7	135,6	0,042
Винт	1	Обеспечивает перемещение в двух взаимноперпедикулярных плоскостях столика	0,45	0,76	34,5	22,8	38,3	95,6	0,03

Стопорный винт	1	Обеспечивает стопорение столика	0,44	0,32	45,2	32,4	50,1	127,7	0,04
Рукоятка	1	Обеспечивает поворот столика	0,34	0,44	42,1	30,1	47,2	119,4	0,037
Призма	1	Обеспечивает исследование поверхностей цилиндрических предметов	0,78	0,56	56,2	35,8	60,7	152,7	0,048
Пластина	1	Обеспечивает поместить предмет любой конфигурации	1	0,76	54,2	44,1	59,7	158	0,049
Механизм нагружения (шток)	1	Обеспечивает необходимое нагружение	0,7	0,43	45,7	34,9	50,1	130,7	0,041
Оправка с алмазной пирамидой	1	Обеспечивает нанесение укола на исследуемый объект	0,8	0,67	67,2	45,5	72,9	185,6	0,058
Гирька	1	Обеспечивает необходимое усилие	0,45	0,62	43,3	33,8	46,7	123,8	0,039
Рукоятка арретира	1	Обеспечивает опускание штока	0,32	0,67	46,5	40,1	48,9	135,5	0,042
Осветитель	1	Обеспечивает освещение исследуемого предмета	0,8	0,9	57,5	50,2	62,5	170,2	0,053
Светофильтры	1	Обеспечивают контрастность исследуемого предмета	0,25	0,31	45,7	38,2	48,4	132,3	0,41
Трансформатор	1	Обеспечивает питание	1,57	1,2	67,9	58,9	77,7	204,5	0,064

5.5 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. 13).

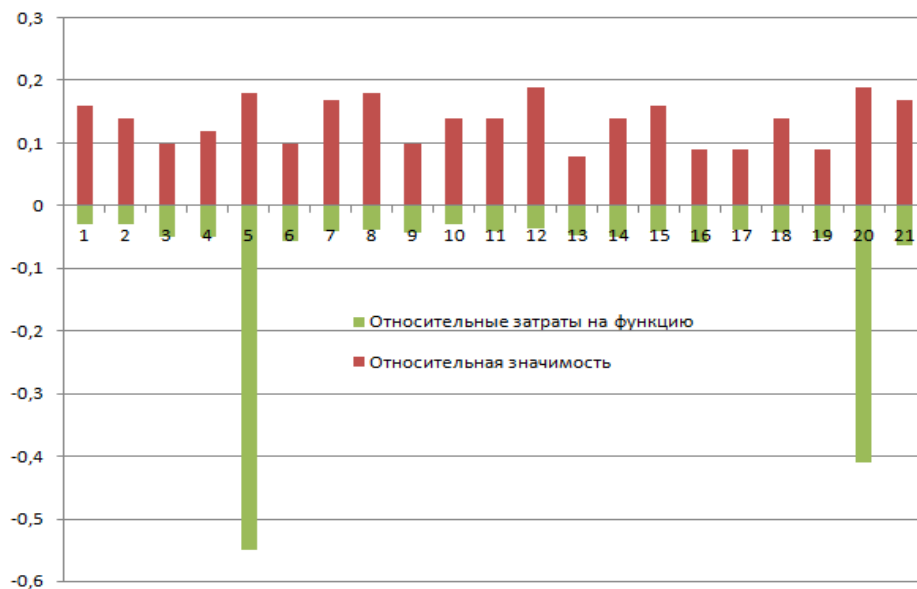


Рис. 13. Функционально-стоимостная диаграмма

Анализ ФСД, приведенный выше показывает, явное наличие рассогласования по функциям 5, 20, которые являются: барашек грубого сечения и светофильтры. Необходимо провести работы по ликвидации данных диспропорций.

5.6 Оптимизация функций выполняемых объектом

В качестве оптимизации данных функций можно выделить следующее:

- применения принципиально новых конструкторских решений;
- унификации сборочных единиц и деталей;
- применения новых заготовок и материалов.

6. Социальная ответственность

При выполнении бакалаврской работы большая часть времени проводилась в лаборатории корпуса 16А. В этой аудитории проводилась определение микротвердости на сварных образцах с помощью микротвердомера ПМТ-3М и определение структуры с помощью компьютера.

Рабочим местом является отдельное помещение (лаборатория). Так как данное помещение находится внутри здания, на проектировщика возможны действия следующих вредных и опасных факторов: отклонение показателей микроклимата, недостаточная освещенность, превышение уровня шума, электрический ток, пожар. Воздействие вредных производственных факторов могут привести к заболеванию и снижению производительности труда самого работающего.

6.1 Производственная безопасность

При организации рабочего места следует принять во внимание тот факт, что качество и производительность труда, зависят от существующих на данном рабочем месте условий труда несоответствия этих условий установленным нормам. Организация рабочего места заключается в выполнении ряда мероприятий, обеспечивающих рациональный и безопасный труд и должна соответствовать ГОСТ 22269–76.

Во время работы с компьютером и микротвердомером возможно воздействие следующих опасных и вредных факторов:

а) физических:

- повышенный уровень шума на рабочем месте;
- недостаточная освещенность рабочей зоны;
- повышенный уровень статического электричества.

К работам с компьютером и микротвердомером допускаются лица:

- прошедшие медицинское обследование;

- прошедшие вводный инструктаж по электробезопасности с присвоением 1-й квалификационной группы;

- прошедшие курс обучения принципам работы с вычислительной техникой и специальное обучение работе на ПЭВМ с использованием конкретного программного обеспечения;

- ознакомленные с инструкциями по эксплуатации на используемые на рабочем месте средства оргтехники (собственно ПЭВМ, принтеры, сканеры, источники бесперебойного питания и т.п.);

- прошедшие проверку знаний правил по охране труда и пожарной безопасности.

Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны

Микроклимат производственных помещений – это климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также температуры окружающих поверхностей. Оптимальные микроклиматические условия обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены, не вызывают отклонений в состоянии здоровья и создают предпосылки для высокой работоспособности.

Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны должны соответствовать ГОСТ 12.1.005–88. Оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха приведены в таблице 5 для категории Ib, к ней относятся работы с интенсивностью энерготрат 121 - 150 ккал/ч (140 - 174 Вт), производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением.

Таблица 5– Оптимальные и допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений (по ГОСТ 12.1.005–88)

Период года	Температура, °С				Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с		
	Льная	Допустимая на рабочих местах				Оптимальная	Допустимая, не более	Оптимальная, не более	Допустимая, не более
		Верхняя		Нижняя					
		Пост.	Не пост.	Пост.	Не пост.				
Холодный	22-24	25	26	21	18	40-60	75	0,1	0,1
Теплый	23-25	28	30	22	20	40-60	70	0,1	0,1

В помещении $t = 23^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 50% и скорость движения воздуха равняется 0,1 м/с. Из таблицы 5 видно, что в анализируемой комнате параметры микроклимата соответствуют нормам.

Микроклимат комнаты поддерживается водяным центральным отоплением, естественной вентиляцией, а также искусственным кондиционированием.

Повышенный уровень шума на рабочем месте

Шум является общебиологическим раздражителем и в определенных условиях может влиять на органы и системы организма человека. Шум ухудшает точность выполнения рабочих операций, затрудняет прием и восприятие информации. Длительное воздействие шума большой интенсивности приводит к патологическому состоянию организма, к его утомлению. Интенсивный шум вызывает изменения сердечнососудистой системы, сопровождаемые нарушением тонуса и ритма сердечных сокращений, изменяется артериальное кровяное давление.

Методы установления предельно допустимых шумовых характеристик стационарных машин изложены в ГОСТ Р ИСО 9612-2013.

Шум на рабочие места может проникать извне через открытые проемы форточек, окон и дверей из кабинета в коридор. Для оценки шума используют частотный спектр измеряемого уровня звукового давления, выраженного в децибелах (дБ), в октавных полосах частот, который сравнивают с предельным спектром, указанным в таблицеб).

Таблица 6 – Уровни звукового давления (по ГОСТ 12.1.003–83)

Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами в Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	50
76	65	59	53	41	41	40	38	35	-

Измеренные значения уровней шума приведены в нижней строке (таб. б). Из таблицы 6 видно, что реальные уровни шума в лаборатории не превышают нормативных значений.

Оценка освещенности рабочей зоны

Освещение рабочего места – важнейший фактор создания нормальных условий труда. Согласно санитарно-гигиеническим требованиям рабочее место лаборанта должно освещаться как естественным, так искусственным освещением. Естественное освещение проникает в помещение через одно большое окно в светлое время суток. Естественное освещение по своему спектральному составу является наиболее приемлемым. Искусственное же

отличается относительной сложностью восприятия его зрительным органом человека.

Недостаточная освещенность рабочего места не только уменьшает остроту зрения, но и вызывает утомление организма в целом, что приводит к снижению производительности труда и увеличению опасности заболеваний человека. Поэтому с целью обеспечения требуемых норм освещенности необходимо произвести расчет искусственной освещенности. Для расчета общего равномерного освещения при горизонтальной рабочей поверхности основным является метод светового потока (коэффициента использования), учитывающий световой поток, отраженный от потолка и стен. При работе с персональным компьютером в сочетании с работой с нормативной и технической документацией, согласно действующим нормам ГОСТ 24940-2016, для искусственного освещения регламентирована наименьшая допустимая освещенность, а для естественного и совмещенного определены коэффициенты естественной освещенности (КЕО).

Нормативное значение КЕО для третьего пояса светового климата (расположение города Томска) в соответствии с ГОСТ 24940-2016 при третьем разряде зрительной работы (IIIг: контраст средний, фон светлый), при естественном боковом освещении $КЕО = 1,2 \%$, освещенность при искусственном освещении – 200 лк, ослепленность 40 ед. и пульсации искусственного освещения не более 15%. Рекомендуемая освещенность для работы с экраном дисплея составляет 200 лк, а при работе с экраном в сочетании с работой с документами 400 лк согласно ГОСТ 24940-2016. СанПиН-2.2.2/2.4-1340-03.

Электробезопасность

Все оборудование должно быть выполнено в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.019–2009.

Лаборатория, в которой выполнялась работа, относится к категории помещений повышенной опасности поражения электрическим током, т.к

присутствует один из следующих факторов: возможность прикосновения одновременно к электрической установке и к заземлению или к двум электрическим установкам.

В процессе работы с компьютером и микротвердомером может возникнуть опасность поражения электрическим током. Основными причинами этого могут послужить следующие факторы: прикосновение к токоведущим частям или прикосновение к конструктивным частям, оказавшимся под напряжением. С целью исключения опасности поражения электрическим током необходимо:

- перед включением компьютера и микротвердомера в сеть должна быть визуально проверена ее электропроводка на отсутствие возможных видимых нарушений изоляции, а также на отсутствие замыкания токоведущих частей на корпус компьютера;

- при замыкании необходимо обеспечить отключение от электрической сети компьютера и микротвердомера путем применения автоматического выключателя или УЗО;

- запрещается при включенном компьютере и микротвердомере одновременно прикасаться к приборам и устройствам, имеющим заземление.

К защитным мерам от опасности прикосновения к токоведущим частям электроустановок относятся: изоляция, ограждение, блокировка, пониженные напряжения, электрозащитные средства.

В лаборатории используемое оборудование заземлено. Его электропитание осуществляется через автоматические выключатели.

К работам на электроустановках допускаются лица, достигшие 18 лет, прошедшие инструктаж и обученные безопасным методам труда. К тому же электробезопасность зависит и от профессиональной подготовки работников, сознательной производственной и трудовой дисциплины. Целесообразно каждому работнику знать меры первой медицинской помощи при поражении электрическим током.

Еще одним вредным производственным фактором является загазованность помещения. Основным источником вредности – выделяемая работниками углекислота.

6.2 Экологическая безопасность

Охрана окружающей среды – это комплексная проблема и наиболее активная форма её решения – это сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства. Охрану природы можно представить как комплекс государственных, международных и общественных мероприятий, направленных на рациональное использование природы, восстановление, улучшение и охрану природных ресурсов.

Многие предприятия сейчас внедряют новейшие технологии в процесс эксплуатации, отчистки и утилизации отходов производства. Так, внедрение электрооборудования, ПЭВМ, различных средств вычислительной техники значительно упрощают процесс проектирования, эксплуатации, а также утилизации и защиты природы от вредных воздействий человечества. Например, инженер, использует электронные пакеты обработки и носители информации, что значительно сокращает применение бумаги, а значит и вырубку тысячи гектаров леса. Но применение ПК и микротвердомера приводит к увеличению затрат электроэнергии, количества электростанций и их мощностей. Соответственно, рост энергопотребления приводит к таким экологическим нарушениям, как глобальное потепление климата, загрязнение атмосферы и водного бассейна Земли вредными и ядовитыми веществами, опасность аварий в ядерных реакторах, изменение ландшафта Земли. Целесообразным является разработка и внедрение систем с малым потреблением энергии. Проблему с выбросом перегоревших люминесцентных ламп можно частично решить при выполнении требований утилизации соответствующих ламп.

При написании дипломного проекта были следующие отходы: использованная бумага и вата, которые в ходе их непригодности выкидывались в мусорное ведро, а затем и в мусорный контейнер. Вредных выбросов в атмосферу и водные источники не производилось, радиационного заражения не произошло, чрезвычайные ситуации не наблюдались, поэтому существенных воздействий на окружающую среду и соответственно вреда природе не оказывалось.

6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Основными причинами возникновения чрезвычайных ситуаций являются, во-первых, внутренние, к которым относятся: сложность технологий, недостаточная квалификация персонала, проектно-конструкторские недоработки, физический и моральный износ оборудования, низкая трудовая и технологическая дисциплина. Во-вторых, внешние чрезвычайные ситуации, - это стихийные бедствия, неожиданное прекращение подачи электроэнергии, воды, технологических продуктов, терроризм, войны.

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.

Для целей обеспечения пожарной безопасности эксплуатация ПК и микротвердомера 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.

Исходя из установленной номенклатуры обозначений зданий по степени пожароопасности, анализируемое в данной работе помещение относится в категории В. Так как в данном помещении, хранят твердые горючие вещества, в том числе выделяющие пыль или волокна, неспособные создавать взрывоопасные смеси с воздухом, а также горючие жидкости (химические растворители).

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

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

Помещение должно быть оборудовано огнетушителями (ОП-3 – 1 шт, ОУ-3 – 1 шт.). На видном месте в помещении вывешены инструкции, обязанности сотрудников и план эвакуации в случае пожара. В случае пожара необходимо сообщить руководителю, вызвать пожарную охрану и покинуть помещение, руководствуясь разработанным и вывешенным планом эвакуации.

На рисунке 14 представлен план эвакуации при пожаре и других ЧС из кабинета 221.

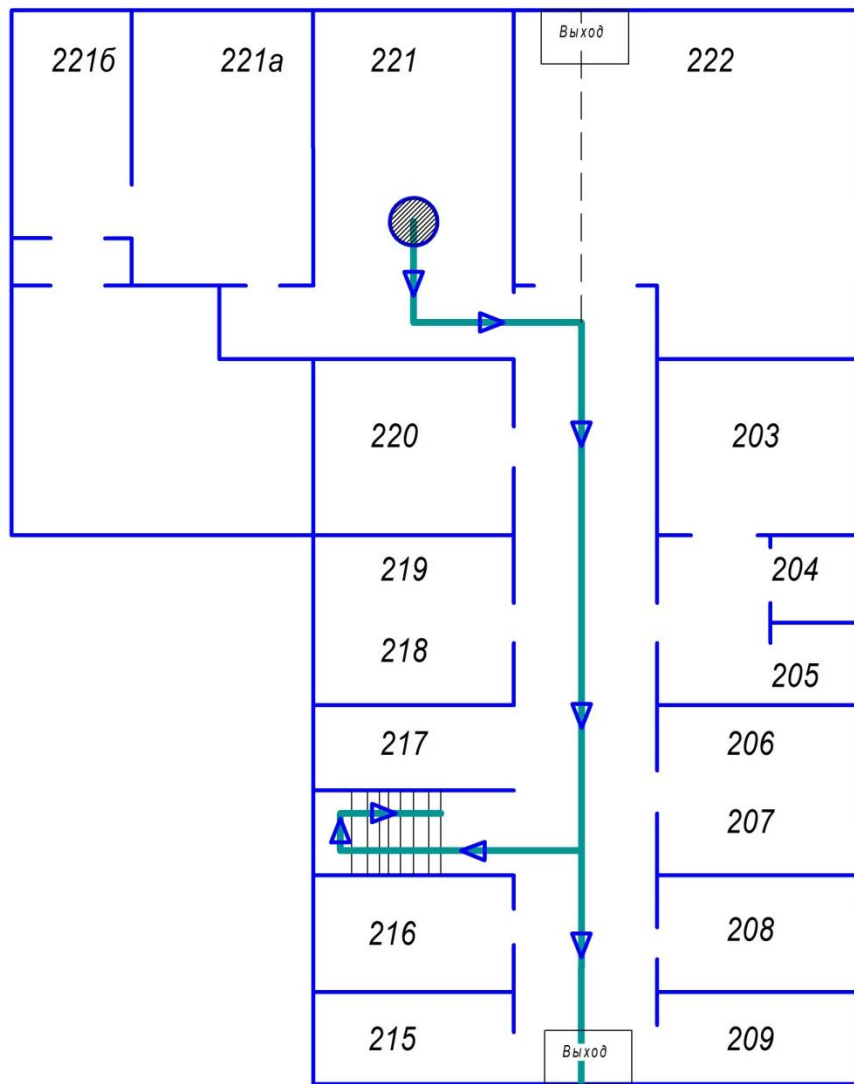


Рисунок 14 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из кабинета 221.

Выводы

В работе были изучены особенности формирования структуры покрытия на основе стали 10P6M5 после импульсного электронно-лучевого оплавления в диапазоне тока луча 40...95 мА. На основании полученных результатов сделаны следующие выводы.

1. В оплавленном металле при токе луча до 50 мА явно выделяются две области с разной степенью травимости (светлая и темная). Темный участок всегда находится в верхней части литого ядра и имеет более дисперсную структуру (4 ГПа) по сравнению со светлой составляющей (6 ГПа). С увеличением тока луча выше 50 мА фиксируется только светлая составляющая в литом ядре.

2. Установлено, что с увеличением тока луча происходит увеличение как размера литого ядра, так и ширины ЗТВ, состоящей из двух участков с различной степенью травимости и дисперсности мартенсита. Микротвердость в ЗТВ соответствует уровню основного покрытия (~7...7,5 ГПа). При токе луча 78 мА происходит перекрытие зон термического влияния от соседних дорожек оплавления.

3. На основании полученных данных в работе можно обосновать 2 наиболее рациональных режима обработки импульсным электронным лучом ранее наплавленного покрытия. Первый: это режим обработки при токе луча до 64 мА, позволяющий получить в литом ядре дисперсную структуру с большим объемом остаточного аустенита и, следовательно, малой твердостью. Второй режим при токе луча 64...78 мА. Он способствует образованию в литом ядре скрытоигольчатого мартенсита с малым содержанием остаточного аустенита (~7...7,5 ГПа).

4. Увеличение тока луча выше 78 мА приводит к перекрытию ЗТВ и дорожек оплавления, что более схоже со сплошной обработкой и менее эффективно для пары трения.

5. В результате исследования объекта микротвердомер ПМТ-3М с помощью Fast – анализа были выявлены функции, которые функционально неоправданны и на них приходится максимальные затраты. Методы для минимизации затрат и их оправдания приведены в пункте 5.6.

Список публикаций студента

1. Курышин К.А., Исакин И. А., Дураков В.Г. Микроструктура и микротвердость покрытия на основе стали 10P6M5 после импульсной электронно-лучевой обработки. Научный руководитель – д.т.н, проф. Гнюсов С.Ф. Сборник научных трудов X Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск 5-6 декабря 2016 г. в 9 ч.: НГТУ – 2016. – Ч.3. С. – 145-147.

2. Курышин К.А., Исакин И. А., Дураков В.Г. Изучение микротвердости покрытия на основе стали 10P6M5 после импульсной электронно-лучевой обработки. Научный руководитель – д.т.н, проф. Гнюсов С.Ф. Сборник трудов V Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск 5-7 декабря 2016 г. ТПУ – 2016. С. – 426.

Приложение А

Раздел №1 1.1 Упрочнение лучами лазера

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ51	Курышин Константин Александрович		

Консультант кафедры ОТСП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Киселев Алексей Сергеевич	к.т.н.		

Консультант – лингвист кафедры ИЯ ИСГТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Плеханова Марина Викторовна	к.п.н.		

1.1 Die konzentrierten Energieflüsse und deren Typen

In diesem Teil der Arbeit wird die Einwirkung auf die Arbeitsflächen von Maschinen und Mechanismen betrachtet. Hier werden auch die durchgeführten Arbeiten und Forschungen von diesem Problem analysiert.

Schon früh, d. h. bei der 1954 beginnenden industriellen Einführung der funkenerosiven Bearbeitung, wurde erkannt, dass dieses Verfahren durch seine Eigenschaft, mit elektrischen Entladungen Material in beliebiger räumlicher Richtung abzutragen, kinematisch sehr flexibel ist. Die heute gebräuchlichen Verfahrensvarianten der Funkenerosion gliedern sich in Senken und Schneiden. Das Hauptanwendungsgebiet liegt im Werkzeug- und Formenbau.

Derzeit Leistungsdichte des konzentrierten Fluss von Energie verwendet ist die $W \approx 10^3 \dots 10^5 \text{ W / cm}^2$ und einer Pulsdauer $\tau \approx 10^{-8} \dots 10^{-5} \text{ s}$. Wenn die Belichtung ist ultraschnelle Erwärmung durchgeführt (bis zu $1 \cdot 10^{10} \text{ K / sec}$) aushärtendes Material. Diese Verfahren ermöglichen, mit einer Oberfläche amorph und nanokristallin Struktur, metastabile Phasen, die Siebmaterial zu bilden, kann nicht erhalten werden, bei herkömmlichen Verfahren.

Als konzentrierte Energiequellen sind weit verbreitet, wie eine Hochleistungs-, gepulste Laser [3], Plasma [4], Ionen- [5] und Elektronenstrahlen [6] verwendet.

1.2 Härten Laserstrahlen

Die Unterscheidung von Lasertypen erfolgt im Allgemeinen anhand eines oder mehrerer Merkmale. Typische Unterscheidungsmerkmale sind:
das laseraktive Medium [8]

- (z. B. CO₂-Laser oder Nd:YAG-Laser),
- der Aggregatzustand des laseraktiven Mediums
- (z. B. Gas-, Flüssig- und Festkörperlaser),
- die Art der (elektrischen oder optischen) Anregung
- (z. B. Gleichstrom- / Hochfrequenzangeregte CO₂-Laser
- oder Lampengepumpte / Diodengepumpte Festkörperlaser),

- die Geometrie des laseraktiven Materials
- (z. B. Stab-, Slab-, Scheiben- und Faserlaser) und
- der Betriebsmodus
- (z. B. kontinuierlich/cw oder gepulst/pw betriebene Laser).

CO₂ – Laser

Der CO₂-Laser ist ein Gaslaser und verwendet ein Gasgemisch aus Helium (He), Stickstoff (N₂) und Kohlenstoffdioxid (CO₂). Das Gasgemisch befindet sich zwischen den Resonatorspiegeln bei Drücken von 100 bis 250 hPa (technisches Vakuum). Lediglich die CO₂-Moleküle operieren hierbei als laseraktives Medium. Die von den angeregten Molekülen emittierte Laserstrahlung hat typischerweise eine Wellenlänge von 10,6 µm. CO₂-Laser erreichen Gesamtwirkungsgrade von 10 bis 13 %, können sowohl kontinuierlich als auch gepulst betrieben werden und erreichen Laserausgangsleistungen von 100 bis ca. 40.000 W [36].

Die Anregung der CO₂-Moleküle erfolgt entweder direkt über Elektronenstöße oder, weit häufiger, indirekt über Stöße mit schwingungsangeregten N₂-Molekülen, die wiederum selbst zuvor durch eine elektrische Gasentladung angeregt wurden. Durch Emission des Lichtquants wird das untere Laserniveau erreicht. Durch Stöße mit He-Atomen, die mit 60 bis 80 % im Gasgemisch enthalten sind, werden die CO₂-Moleküle wieder in das Grundniveau überführt.

Gleichstromangeregte CO₂-Laser können kostengünstig hergestellt werden und erreichen unter den CO₂-Lasern den vergleichsweise höchsten Wirkungsgrad. Dennoch verursacht die Wechselwirkung von Elektroden und Gasmolekülen einen Elektrodenabbrand, der sowohl eine Reinigung als auch den teilweisen Austausch des Gasgemischs erfordert. Die damit verbundenen Betriebs- und Wartungskosten für den Austausch der Elektroden mindern den Vorteil des guten Wirkungsgrades, so dass im Allgemeinen bei Laserleistungen grösser als 2 kW eine hochfrequente Wechselstromanregung bevorzugt wird.

Hochfrequenzangeregte CO₂-Laser koppeln die elektrische Energie kapazitiv ein (Elektroden und Lasergas haben keinen direkten Kontakt) und weisen daher keinen Verschleiss auf. Daneben können hochfrequenzangeregte Laser deutliche höhere Pulswiederholraten realisieren, welches sie für eine Vielzahl von weiteren Applikationen qualifiziert.

Da der Grossteil der elektrischen Energie in Wärme umgesetzt wird, ist die Kühlung des Gasgemisches unerlässlich. Hierzu wird das Lasergas in Bewegung versetzt und durch Wärmetauschergeführt. Bei *quergeströmten CO₂-Lasern* wird das Gasgemisch senkrecht und bei *langgeströmten CO₂-Lasern* parallel zur optischen Achse des Resonators umgewälzt. Im Vergleich zeichnet sich die quergeströmte Bauform grundsätzlich durch einen höheren Wirkungsgrad und einen geringeren Gasverbrauch aus, welches sich positiv auf die Betriebskosten auswirkt. Langgeströmte Bauformen erzielen eine höhere Strahlqualität ($K_{längs} > 0,4$ und $K_{quer} > 0,18$) bei gleichzeitig höheren Ausgangsleistungen ($P_{längs} < 20$ kW und $P_{quer} < 10$ kW) [36].

Diffusionsgekühlte CO₂-Laser verzichten auf eine Umwälzung des Lasergasgemisches. Damit muss die Wärmeausschliesslich über Wärmeleitungsabgefahren werden. Mit diffusionsgekühlten Systemen wird im Allgemeinen eine ausgezeichnete Strahlqualität ($K_{diff} > 0,9$) erzielt. Bei *sealed-off CO₂-Lasern* wird das Lasergas in ein Rohr aus Quarzglas eingeschlossen. Trotz effizienter Kühlung der Rohrwand können so lediglich 50 W Ausgangsleistung pro Meter Rohrlänge gewonnen werden. Unter Berücksichtigung der erforderlichen Baugrösse beträgt die Ausgangsleistung handelsüblicher sealed-off CO₂-Laser lediglich 100 bis 600 W. Ein grosser Vorteil dieser Bauweise ist, dass kein Gas verbraucht wird. Laserleistungen bis 8 kW bei gleich guter Strahlqualität erzielen die (diffusionsgekühlten) *CO₂-Slablaser*.

Der Gasverbrauch bei dieser Variante ist vernachlässigbar gering. Die Hochfrequenzgasentladung findet zwischen zwei rechteckigen Kupferelektroden statt. Die grossflächigen Elektroden sind wassergekühlt, so dass bei einem geringen Abstand der Platten eine ausreichende Kühlung des Gasgemisches über

Wärmeleiter erfolgt. Der aufgespannte Entladungsraum ist folglich quaderförmig und besonders flach, welches den Lasern ihren Namen verleiht (engl.: Slab = dt.: Platte). Der ausgekoppelte Teilstrahl ist zunächst rechteckig und wird durch geeignete Optiken in einen rotationssymmetrischen Strahl umgeformt. Im Vergleich zu langgestromten CO₂-Lasern ist diese Bauweise ausserst kompakt und wartungsfreundlicher.

Festkörperlaser (Nd:YAG und Yb:YAG)

In *Festkörperlasern* wird als laseraktives Medium ein mit laseraktiven Ionen dotierter Wirtskristall (oder Glas) verwendet. Das Festkörpermedium ist transparent und im Idealfall für das Laserlicht vollkommen durchlassig. Eine äusserst geeignete Kombination ist das mit Neodymionen (Nd³⁺) dotierte Yttrium-Aluminium-Granat (YAG \equiv Y₃Al₅O₁₂). Die Anregung der laseraktiven Ionen erfolgt ausschliesslich durch Absorption von optischer Strahlung, welches den Einsatz von Lichtquellen mit geeigneten Lichtspektren als Pumpquelle verlangt. Die von den Neodymionen emittierte Laserstrahlung hat eine charakteristische Wellenlänge von 1064 nm. Neben Neodym wird auch Ytterbium (Yb) als laseraktives Material eingesetzt. Das Laserlicht der Ytterbiumionen (Yb³⁺) hat eine Wellenlänge von 1030 nm.

Im Gegensatz zur CO₂-Laserstrahlung ($\lambda \sim 10 \mu\text{m}$) wird die Laserstrahlung von Festkörperlasern ($\lambda \sim 1 \mu\text{m}$) von industriellen Standardgläsern, wie z. B. Quarz- oder Bor-Kronglas, kaum absorbiert. Hieraus folgt ein bedeutender Vorteil bei der Verwendung von Festkörperlasern, da ihr Laserlicht durch flexible Lichtleitfasern an die Bearbeitungsstelle gefahren werden kann. Daneben ergeben sich weitere Kosteneinsparungspotentiale bei der Herstellung optischer Linsen, da günstige Glaswerkstoffe für den Linsenrundkörper verwendet werden können [36].

Festkörperlaser können grundsätzlich kontinuierlich oder gepulst betrieben werden. Das Pulsieren kann entweder durch Steuern der optischen Pumpleistung („GainSwitching“, minimale Pulsdauern von 50 μs bei maximal 4 kHz) oder durch eine *Guteschaltung* („Q(uality)-Switching“) realisiert werden. Letztere Methode verwendet ein elektro-optisches Schaltelement mit ultrakurzen Schaltzeiten und

erzielt so signifikant kürzere Pulsdauern (10 bis 500 ns) bei gleichzeitig höheren Wiederholraten (bis 100 kHz). Das laseraktive Medium wird hierbei kontinuierlich gepumpt. Das Schaltelement blockiert den Resonator und öffnet erst, wenn eine ausreichend hohe Inversionsrate erreicht ist. Aufgrund dieses Funktionsprinzips erzielen gatedeschaltete Laser neben kurzen Pulsdauern und hohen Frequenzen auch überdurchschnittlich hohe Pulsspitzenleistungen.

Der Leistungsbereich handelsüblicher Festkörperlaser erstreckt sich von 20 bis 6000 W. Im Pulsbetrieb werden Spitzenleistungen bis 10 MW bei 100 kHz erzielt. Der elektrisch-optische Wirkungsgrad liegt zwischen 5 (lampengepumpter Stab laser) und 25 % (Scheiben- und Faserlaser). Die unterschiedlichen Bauformen werden entweder nach Art der optischen Anregung oder nach Geometrie des Festkörperkristalls unterschieden.

Die meist verbreitete Bauform ist der *Stab laser*. Zum Einsatz kommen stabförmige Nd:YAG-Kristalle mit einem Durchmesser von 2 bis 8 mm und einer Länge zwischen 20 und 200 mm. Typischerweise werden die Achsen des Laserstabs und der ebenso stabförmigen Gasentladungslampe jeweils im Brennpunkt eines elliptischen Reflektors platziert. Das Funktionsprinzip mit zwei Gasentladungslampen. Im cw-Betrieb erreicht ein Laserstab eine Leistung bis 800 W. Durch Reihenschaltung mehrerer Kavitäten kann eine effiziente Leistungsskalierung vorgenommen werden. Lampengepumpte Hochleistungslaser dieser Art erzielen Ausgangsleistungen bis 4 kW (8 Kavitäten, Wirkungsgrad ca. 4 %) bei einer Strahlqualität von 25 mm·mrad (SPP) und koppeln das Laserlicht in eine 600 µm Lichtleitfaser ein.

Das ohnehin enge Absorptionsspektrum der laseraktiven Neodymionen bei 808 nm wird durch das breite Emissionsspektrum der Gasentladungslampen nur schwach angesprochen. Alternativ zu den Gasentladungslampen können auch Diodenlaser als Pumpquelle verwendet werden. Durch Abstimmen der Wellenlänge von AlGaAs-Diodenlasern wird die Pumpeffizienz derart gesteigert, dass diodengepumpte Festkörperstab laser Wirkungsgrade von 10 % erzielen. Obgleich eine Verbesserung der Strahlqualität im Vergleich zu lampengepumpten Stab lasern

erzielt wird ($SPP_{dg}/SPPlg = 16/25$ bei 3 kW), gestaltet sich die industrielle Einführung dieser Bauform als Hochleistungslaser schwer. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Laserdioden im Vergleich zu Blitzlichtlampen teuer sind und der Anschaffungspreis des Systems entsprechend steigt. Überdies wurde nahezu zeitgleich der Scheibenlaser mit grossem Erfolgspotential entwickelt.

Der *Scheibenlaser* ist ebenfalls ein diodengepumpter Festkörperlaser. Scheibenlaser verwenden ablicherweise Yb:YAG als laseraktives Medium und erzielen Wirkungsgrade zwischen 10 und 25 % bei Laserausgangsleistungen bis 4 kW. Zudem wird bei diesem Leistungsniveau eine bemerkenswerte Strahlqualität von 8 mm·mrad (SPP) erzielt. Die aussergewöhnliche Leistungssteigerung wurde durch ein neuartiges Konzept mit scheibenförmiger Geometrie des Festkörperkristalls möglich. Die Kristallscheibe hat nur eine geringe Dicke von ca. 200 µm und liegt flach auf einem Kühlkörper. Die Kontaktfläche der Scheibe ist verspiegelt. Die Spiegelfläche fungiert als Resonatorspiegel der Laserstrahlung zum einen und als Umlenkspiegel der stirnseitig einfallenden Pumpstrahlung zum anderen. Aufgrund der geometrisch idealen Wärmeleitungsverhältnisse sind die Temperaturgradienten (insbesondere in Richtung der Resonatorachse) im Laserkristall minimal [36].

Negative Effekte wie die Entstehung einer thermischen Linse bei Stabsystemen treten daher kaum auf, welches zu der hohen Strahlqualität führt. Das Laserlicht wird ablicherweise in Lichtleitfasern mit einem Durchmesser von 150 oder 300 µm eingekoppelt. Darüber hinaus wird im Gegensatz zu den Stabsystemen das Pumplicht der Diodenlaser mehrfach in den Laserkristall eingekoppelt, so dass hohe Wirkungsgrade erzielt werden. Die maximale Ausgangsleistung einer Laserscheibe beträgt ca. 1 kW. Die Leistungsskalierung erfolgt über die Serienanordnung mehrerer Scheibensysteme.

Neben den bereits beschriebenen Bauformen existieren noch weitere diodengepumpte Bauformen, wie z. B. die longitudinal gepumpten Stabsysteme oder *Slablaser*-Systeme. Das (mittlere) Leistungsniveau dieser Laser ist im Allgemeinen gering (10 bis 500 W). Im Vergleich zu Hochleistungslasern, die beim Schweißen und Schneiden ihren Einsatz finden, werden diese Systeme für Mikroverfahren

(Mikroschweissen und -schneiden, Laserstrahlstrukturieren bzw. Beschriften oder Bohren) eingesetzt. Diese Verfahren erfordern kleinste Fokusburchmesser und höchste Intensitäten. Hierzu wird eine entsprechend hohe Strahlqualität benötigt, die nahe oder gleich dem theoretisch Möglichen liegt ($M^2 \sim 1$). Die Intensität im Brennfleck kann um ein Vielfaches gesteigert werden, wenn Strahlungsenergie gesammelt und anschliessend in kürzester Zeit emittiert wird. Dieses Verfahren wird durch eine Guteschaltung umgesetzt und findet besonders in Slablasern seine Anwendung.

Auch der Faserlaser ist ein diodengepumpter Festkörperlaser und basiert auf einem vergleichsweise einfachen Prinzip. Für Faserlaser werden Stufenindex-Glasfasern verwendet, die einen mit laseraktiven Ionen (z. B. Ytterbium Yb oder Erbium Er) dotierten Faserkern besitzen. Das Pumpen erfolgt entweder durch koaxiales Einkoppeln der Pumpstrahlung in eines der beiden Faserenden oder seitliches Anspalten von diodengepumpten (Pump-)Fasern an den transmissiven Fasermantel. Die Faserenden der dotierten Faser sind verspiegelt (ggf. teildurchlässig) und erzeugen so den Resonator. In beiden Fällen wird die Pumpstrahlung bis zur vollständigen Absorption an den Faserinnenflächen (Mantel und Enden) reflektiert. Dabei werden die laseraktiven Ionen des dotierten Faserkerns angeregt. Die Verstärkung erfolgt somit entlang der Faser, so dass am Ende der Faser das emittierte Laserlicht austritt. Aufgrund der grossen Oberfläche der meterlangen Fasern kann die Abwärme an die Umgebung abgegeben werden. Fasersysteme erweitern sowohl im cw- als auch im pw-Betrieb die Leistungsgrenzen marktüblicher Lasersysteme. Je nach Leistungsklasse und Konfiguration erreichen Faserlaser im Pulsbetrieb Spitzenwerte von beispielsweise 50 kW Pulsspitzenleistung bei einer Pulsdauer von 3 ps und einer Strahlqualität $M^2 \sim 1,05$. Pulsdauern im Femtosekundenbereich (mit 1 fs = 10^{-15} s) sind ebenfalls möglich. Im Dauerstrichbetrieb werden Spitzenleistungen von 10 kW bei einer aussergewöhnlichen Strahlqualität von 6 mm·mrad (SPP) und einem Wirkungsgrad von 25 % erzielt. Selbst bei diesen hohen Ausgangsleistungen ist ein Pulsbetrieb bis 20 kHz möglich. Überdies sind Faserlaser nahezu wartungsfrei.

Hochleistungsdiodenlaser (HDL)

Das aktive Medium von Halbleiterlasern sind dotierte Halbleiterkristalle. Dabei werden die besonderen Eigenschaften indirekter Halbleiter in Verbindung mit unterschiedlichen Dotierungen genutzt. Für Hochleistungsdiodenlaser wird häufig das Materialsystem GaAlAs/GaAs verwendet. Die Wellenlänge der emittierten Laserstrahlung hängt von dem Mischungsverhältnis der drei- oder vierkomponentigen Halbleiter (hier: GaAlAs) ab, welches im Allgemeinen innerhalb materialspezifischer Grenzen variiert werden kann. Das GaAlAs/GaAs Materialsystem emittiert daher je nach Zusammensetzung des GaAlAs-Halbleiters eine charakteristische Wellenlänge zwischen 750 und 920 μm .

Im Vergleich zu allen anderen Festkorperlaser zeichnen sich Laserdioden dadurch aus, dass sie direkt durch Anlegen eines elektrischen Stroms angeregt werden können. Hierdurch entfällt die sonst übliche Umwandlung von elektrischer Leistung in optische Pumpenergie, so dass der Wirkungsgrad von Diodenlasern einen unübertroffenen Wert von 50 % erreicht. Im Vergleich mit anderen Lasermedien ist die Dichte der laseraktiven Atome in Halbleitern um ein Vielfaches höher, welches gleichermassen eine überdurchschnittlich hohe Leistungsdichte zur Folge hat. Dennoch ist das aktive Volumen eines Emitters aus technischen und physikalischen Gründen auf kleinste Abmessungen begrenzt. Die Grösse eines modernen *Hochleistungsdiodenlasers* beträgt typischerweise 1 mm (L) x 200 μm (B) x 100 μm (H). Das erhebliche kleinere laseraktive Volumen emittiert dabei einen Rohstrahl mit einer Abmessung von ca. 200 μm (B) x 1 μm (H). Moderne Hochleistungsemitter erreichen dabei eine Laserausgangsleistung von ca. 2 bis 3 W. Durch laterale Aneinanderreihung von 20 bis 30 Emittoren erhält man einen so genannten *Laserbarren* mit einer Grösse von ca. 1 mm (L) x 10 mm (B) x 100 μm (H) und einer typischen Ausgangsleistung von 40 bis 60 W. Dabei bestehen Laserbarren aus einer Vielzahl von Einzelemittoren, die zusammenhängend auf Halbleiterwafern hergestellt werden. Da die Strahlungsemission eine starke Abhängigkeit von der Temperatur

aufweist, werden die Laserbarren zur Kühlung auf Warmesenkengelötet oder geklebt. Aufgrund der Notwendigkeit zur Kühlung durch eine Warmesenkevergrossern sich die Abmasse des Laserbarrens um ein Vielfaches. Der Barren inklusive der Warmesenke hat dann eine typische Grösse von 30 mm (L) x 10 mm (B) x 2 mm (H). Das von einem Laserbarren ausgestrahlte Laserlicht hat schliesslich die Charakteristik einer schmalen Linie.

Kennzeichnend für die Strahleigenschaften eines einzelnen Diodenlasers (barrens) ist die stark unterschiedliche Strahldivergenz in lateraler (entlang der Laserlinie – „Slow-Axis“) und transversaler Richtung (senkrecht zur Laserlinie – „Fast-Axis“). Aufgrund der im Vergleich zur Wellenlänge grossen Emitterbreite wird in lateraler Richtung lediglich eine Strahlqualität von $M^2 = 20$ bis 30 erzielt. Der laterale Divergenzwinkel beträgt üblicherweise 5° . Da auf einem Barren 20 bis 30 Emitter mit lateralen Abständen von ca. 200 μm angeordnet sind, verschlechtert sich die effektive Strahlqualität erheblich. Nahezu umgekehrte Verhältnisse sind in transversaler Richtung anzutreffen. Trotz eines grossen Divergenzwinkels von ca. 35° wird eine Strahlqualität $M^2 = 1$ erzielt. Der Strahl ist demnach in transversaler Richtung beugungsbegrenzt, was auf die minimale Grösse der laseraktiven Zone in transversaler Richtung (\sim Wellenlänge) zurückgeführt werden kann. Durch Kollimation (Parallelisierung) in transversaler Richtung wird die Divergenz auf ein Minimum ($< 1^\circ$) reduziert, so dass die laterale Divergenz im Vergleich zur transversalen grossausfällt. Aufgrund des grossen Öffnungswinkels erfolgt die Kollimation in unmittelbarer Nähe des Emitters mit Hilfe von zylindrischen Mikrolinsen.

Zur Leistungsskalierung werden die Laserbarren inklusive der adaptierten Warmesenken und Mikrolinsen zu so genannten *Diodenlaserstacks* (Stack/eng. = Stapel/dt.) kombiniert. Bis zu 30 Laserbarren können zu einem Stack gestapelt werden, so dass Ausgangsleistungen über 1 kW pro Stack üblich sind. Das Geraderichten (Kollimation) des Strahls in Richtung der Slow-Axis erfolgt dann mit Hilfe einer Zylinderlinse. Die Fokussierung erfolgt im Anschluss mit asphärisch geformten Linsen.

Im Vergleich zur Grosse des Barrens sind die geometrischen Abmessungen der Warmesenkengross. Daher entspricht das Strahlungsbild eines Laserstacks einer Vielzahl von schmalen Linien mit vergleichsweise grossen Abständen. Zur Erhöhung der Leistungsdichte können nun die Zwischenräume mit dem Strahlungsbild eines zweiten und ggf. Dritten Laserbarrens überlagert („aufgefüllt“) werden. Weitere Methoden der Leistungsskalierung sind die Überlagerung verschiedener Wellenlängen sowie die Überlagerung entgegengesetzt polarisierter Strahlen.

Darüber hinaus können für einen Ausgleich der achsabhängigen Strahlqualität optische Systeme eingesetzt werden, die sich aus einer komplexen Anordnung von Treppenspiegeln zusammensetzen. Mit Hilfe der beschriebenen Techniken zur Leistungsskalierung werden Laserleistungen bis 6 kW erzielt.

Die im Vergleich zu anderen Hochleistungslasern schlechte Strahlqualität erfordert kurze Strahlwege mit der Konsequenz, dass Diodenlaser nah am Prozess geführt werden müssen. Sowohl die Baugrosse als auch das Gewicht von Diodenlasern ist typischerweise klein, so dass eine prozess nahe Führung des Lasers mit Hilfe von Robotern oder ähnlichen Anlagen gut möglich ist. Dennoch ist bei dieser Konstellation zu berücksichtigen, dass der Laser durch eine Fehlbedienung der Anlage leicht zu Schaden kommen kann.

Da Diodenlaser wie Festkörperlaser Laserlicht mit einer Wellenlänge von ca. 1 μm emittieren, besteht auch hier die Möglichkeit, den Laserstrahl mit Hilfe von Lichtleitfasern zu führen. Die geringe Strahlqualität erfordert dennoch bei Leistungen über 2 kW den Einsatz von grossen Faserdurchmessern mit Durchmessern von 1,0 bis 1,5 mm. Durch Einsatz einer Lichtleitfaser wird das eingekoppelte Intensitätsprofil homogenisiert, so dass schliesslich eine runde Brennfleckgeometrie entsteht.

Nicht nur der hohe elektrisch-optische Wirkungsgrad von ca. 50 %, sondern auch der nahezu wartungsfreie Betrieb sind die ausschlaggebenden Argumente für den Einsatz von Hochleistungsdiodenlasern. Die moderate Strahlqualität reduziert die Einsatzmöglichkeiten dennoch auf Bereiche, die keine hohe Strahlqualität erfordern. Beispiele hierfür sind das (Wärmeleitungs-)Schweissen, Harten, Hartloten, Auftragsschweissen und Beschichten.

Список используемых источников

- 1 Игнатов А.А.// Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2015. – 127 с.
- 2 Гнусов С.Ф. Электронный луч в формировании неравновесных структур: монография/ Гнусов С.Ф., Дураков В.Г. Томский политехнический университет. - Томск: Издательство ТПУ, 2012.-115с.
- 3 Магин Д.Ю., Костромин С.В. Исследование структуры и свойств высокопрочной теплостойкой стали после объемной термической обработки и лазерного поверхностного упрочнения. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алкеева № 4(101). УДК 621.789. С. – 256-261.
- 4 Самотугин С.С., Малинов Л.С., Самотугина Ю.С. Повышение износостойкости высокопрочного чугуна плазменным поверхностным упрочнением. Висник Приазовского державного технического университета. Вип. № 14. УДК 621.771.07.001.5
- 5 Савин И.А. Формирование базы данных вариантов материала режущей части инструмента и метода его поверхностного упрочнения. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ (НЧФ КНИТУ - КАИ). Машиностроение и автоматизация. УДК 621.9.01. С. – 97-105.
- 6 Мац А.В., Мац В.А., Нетесов В.М., Соколенко В.И. Влияние электронного облучения на механические характеристики наноструктурированных цирконий-ниобиевых сплавов. ННЦ Харьковский физико-технический институт. УДК 621.039;539.12. С. – 61-67.
- 7 Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб.пособие для вузов. Под ред.А.Г. Григорьянца. - М.; Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006.- 664 с.: ил. -ISBN 5-7038-2701-9.
- 8 Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление / Пер. с яп. В.Н. Попова; Под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. - М.; Машиностроение, 1985.- 240 с., ил.

9 Белова С.А. Возможности лазерного легирования при изготовлении быстрорежущего инструмента. Изд-во ПГТУ – Пермь.- 2002. –С 7.

10 Борозинец В.Э., Костромин С.В. Исследование структуры и свойств инструментальных сталей после лазерного упрочнения. // Современные инновации в науке и технике. Нижний Новгород. – 2013.-С. 28-31.

11 Чурносов Д.И., Козик Е.С., Голявин К.А. Поверхностное упрочнение заготовок из порошковых сталей с использованием лазерного нагрева //ВЕСТНИК ОГУ №1 (150).-2013.-С. 228-231.

12 Любоченко Л.А. и др. Повышение износостойкости стальных поверхностей путем лазерной обработки. УДК 621.785.54.- С.7.

13 Елагина О.Ю., Агеева Е.Н. Прогнозирование структуры структурно-фазовых превращений в железоуглеродистых сталях при лазерном упрочнении с позиции термодинамического подхода // Перспективные материалы. 2003.-№5.-С. 89-93.

14 Бурлаченко О.В., Тихвинская А.Ю. Упрочнение высокопрочного чугуна излучением YAG:Nd-излучением // Физика и химия обработки материалов. 2009.- №3.-С. 55-57.

15 Ярьсько С.И. Влияние состава кобальтовой фазы сплавов на изнашивание инструмента после лазерного излучения // Модифицирование поверхности, в том числе пучками заряженных частиц, потоками фотонов и плазмы. 2009.- №3.-С.54-61.

16 Полетика И.М, Голковский М.Г. и др. Формирование упрочняющих покрытий методом наплавки в пучке релятивистских электронов//Физика и химия обработки материалов. 2005.-№5.-с. 29-41.

17 Гнюсов С.Ф, Дураков В.Г. и др. Ч.1. Особенности технологии наплавки и подготовки композиционных наплавочных смесей// Сварочное производство. 2007.-№12.- С. 12-15.

18 Хайдарова А.А, Гнюсов С.Ф. Влияние тепловложения при плазменной порошковой наплавке стали 10P6M5 на структуру и твердость покрытия при

наплавке одиночного валика (Ч.1) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 7. – С. 81-88.

19 Мищенко Е.С., Гнюсов С.Ф. XX Международная научно-практическая конференция «Современная техника и технологии». – С.191-192.

20 Белюк С.И., Самарцев В.П., Гальченко Н.К. и др. // Физическая мезомеханика 9. Спец выпуск. 2006. - С . 157-160.

21 Гнюсов С.Ф., Дураков В.Г., // Физическая мезомеханика 7. Спец выпуск. Ч.2. 2006. – С. 197-200.

22 Гнюсов С.Ф., Игнатов А.А., Дураков В.Г. // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 2. – С. 76-84.

23 Гнюсов С.Ф., Дураков В.Г. // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 322. № 2. – С. 111-115.

ахадилов Б.К., Кожанова Р.С., Тажибаева Г.Б. // Научный журнал «Globus» Технические науки сборник научных публикаций. 2015. – С. 37-42.

24 Cherenda N.N., Uglov V.V., Anishchik V.M.// Modification of AISI M2 steel tribological properties by means of plasma mixing. Elsevier.Vakuum.- №81.- 2007.- с. 1337–1340.

25 Cao H.T., Dong X.P., Pan Z., Wu X.W.// Surface alloying of high-vanadium high-speed steel on ductile iron using plasma transferred arc technique: Microstructure and wear properties// Elsevier. Material and Design. 2016. – с 223-234.

26 Mei X.X., Sun W.F., Hao S.Z.// Surface modification of high-speed steel by intense pulsed ion beam irradiation. Elsevier. Surface and Coatings Nechnology. № 201. 2007. – с. 5072-5076.

27 Cherenda N.N., Uglov V.V., Anishchik V.M.// Modification of AISI M2 steel tribological properties by means of plasma mixing. Elsevier. Vakuum. № 81. 2007. – с. 13370-1340.

28 Ozbek Y.Y., Akbulut H., Durman M.// Surface properties of M2 steel treated by pulse plasma technique. Elsevier. Vakuum. № 122. 2015. – с. 90-95.

29 Gnusov S.F., Ignatov A.A., Durakov V.G., Tarasov S.Yu.// The effect of thermal cycling by electron-beam surfacing on structure and wear resistance of deposited M2 steel. Applied Surface Science. № 263. 2012. – с. 215-222.

30 Garcia C., Romero A., Herranz G. // Effect of vanadium carbide on dry sliding wear behavior of powder metallurgy AISI M2 high speed steel processed by concentrated solar energy. Materials Characterization. № 121. 2016. – с. 175-186.

31 Рахадиллов Б.К., Кожанова Р.С., Тажибаева Г.Б. // Научный журнал «Globus» Технические науки сборник научных публикаций. 2015. – С. 37-42.

32 Bonek M., Dobrzański L.A., Klimpel A.// Structure and properties of hot-work tool steel alloyed by WC carbides by a use of high power diode laser. Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. № 24. 2007. – с. 175 – 178.

33 Dobrzański L. A., Jonda E., Labisz K. // Comparison of the abrasion wear resistance of the laser alloyed hot work tool steels. Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. № 55. 2012. – с. 85 – 92.

34 Гнусов С.Ф., Хазанов И.О., Советченко Б.Ф. и др. Применение эффекта сверхпластичности сталей в инструментальном производстве / - Отв. ред. док.физ.-мат. наук, проф. Е.Ф. Дураков. – Томск: Изд-во НТЛ, 2008. – 240с. ISBN 978-5-89503-383-8

35 Fritzn K., Wilfried K. // Fertigungsverfahren. Abtragen, Generieren Lasermaterialbearbeitung. Springer. № 3. С. 412.