

**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 Машины и технологии сварочного производства  
Кафедра оборудования и технологии сварочного производства

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Разработка алгоритма выбора параметров режима плазменно-порошковой наплавки Fe-Cr-V-Mo-C сплавов.</b>

УДК 621.791.927.55:669.058.66:620.17

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ51	Гончаров Артём Витальевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Гордынец Антон Сергеевич	Кандидат технических наук		

Соруководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Дегтерев Александр Сергеевич	-		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Николаенко Валентин Сергеевич	-		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гусельников Михаил Эдуардович	Кандидат технических наук		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Заведующий кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Киселёв Алексей Сергеевич	Кандидат технических наук		

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 Машины и технологии сварочного производства  
Кафедра оборудования и технологии сварочного производства  
Период выполнения: (осенний / весенний семестр 2016/2017 учебного года)

Форма предоставления работы:

<b>Магистерская диссертация</b> (бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ – ПЛАН**  
**Выполнения выпускной квалификационной работы**

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

Дата контроля	Название раздела(модуля)/ вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
03.03.2017	1. Литературный обзор.	15
15.03.2017	2. Подготовка оборудования к проведению экспериментов.	10
29.03.2017	3. Подготовка материалов к проведению экспериментов.	11
06.04.2017	4. Проведение экспериментов	17
12.04.2017	5. Анализ результатов экспериментов	20
20.04.2017	6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и Ресурсосбережение.	12
27.04.2017	7. Социальная ответственность	9
03.05.2017	8. Заключение	6

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Дегтерев А.С.	-		

Согласовано:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОТСП	Киселев А.С.	Кандидат технических наук		

**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 Машины и технологии сварочного производства  
 Кафедра оборудования и технологии сварочного производства

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. Кафедрой ОТСП  
 \_\_\_\_\_  
 (Подпись) (Дата) Киселев А.С.  
 (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
1BM51	Гончарову Артёму Витальевичу

Тема работы:

Разработка алгоритма выбора параметров режима плазменно-порошковой наплавки Fe-Cr-V-Mo-C сплавов.	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	18.10.2016 №8895/с

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

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Результаты исследования макро- и микростроения покрытий, полученных на различных режимах плазменной наплавки Fe-Cr-V-Mo-C порошкового сплава. Сведения о скорости изнашивания упрочняющих слоев.</p>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>введение; литературный обзор, посвященный вопросам влияния параметров режима наплавки на структуру и свойства формируемых покрытий, раздел, описывающий материалы и методы исследования, используемые в работе; экспериментальная часть, содержащая анализ связи основных параметров режима плазменной наплавки с макро-размерами и микроструктурой получаемых покрытий, алгоритм выбора оптимального с позиции производительности, требуемой геометрии, качества и износостойких свойств наплавляемого слоя, программу, осуществляющую автоматический поиск оптимального режима наплавки.</p>

--	--

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
1. Литературный обзор 2. Материалы и методы исследования 3. Экспериментальная часть 4. Заключение	Дегтерев Александр Сергеевич
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Николаенко Валентин Сергеевич
6. Социальная ответственность	Гусельников Михаил Эдуардович
7. Английский язык	Казанцев Андрей Юрьевич

**Название разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

1. Литературный обзор
-----------------------

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Дегтерев А.С.	-		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ51	Гончаров А.В.		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1ВМ51	Гончаров Артём Витальевич

<b>Институт</b>	<b>Неразрушающего контроля</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ОТСП</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Машины и технологии сварочного производства

### 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"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)</li> <li>– негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)</li> <li>– чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</li> </ul>	<p>Рабочим местом является научная лаборатория. Поскольку данное помещение находится внутри здания, на проектировщика возможны действия следующих факторов:</p> <p>Вредные факторы: отклонение показателей микроклимата, недостаточная освещенность, превышение уровня шума.</p> <p>Опасные факторы: ультрафиолетовое излучение, пожар, электрический ток.</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</p>	<p>Техника пожарной безопасности на производстве (ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ). Техника безопасности при работе с электро- и радиотехническими устройствами (ГОСТ 12.1.006-84). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны ГОСТ12.1.005-88 (с изм. №1 от 2000 г.) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. ГОСТ 12.1.019-79 (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"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</li> </ul>	<p>Повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне.</p> <p>Повышенный уровень шума на рабочем месте.</p> <p>Недостаточная освещенность рабочей зоны.</p> <p>Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны.</p>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> </ul>	<p>При работе с компьютером, который соединён с сетью напряжения, возможны электрические замыкания (удары) для персонала и пожары.</p>

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

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гусельников М.Э.	Кандидат технических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ51	Гончаров А.В		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1BM51	Гончаров Артём Витальевич

<b>Институт</b>	<b>Неразрушающего контроля</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ОТСП</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Машины и технологии сварочного производства

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

Fast - анализ

Объектом исследования выбран микротвердомер HVS-1000.

**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:**

1. Функционально стоимостная диаграмма Fast

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

**Задание выдал консультант:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1BM51	Гончаров А.В.		

## **Реферат**

Магистерская диссертация включает в себя: 103 страницы, 13 рисунков, 19 таблиц, 15 формул, 20 источников.

Ключевые слова: плазменно-порошковая наплавка, параметры режима, полный факторный эксперимент, планирование эксперимента, уравнение регрессии, поиск решение, оптимизация и программное обеспечение.

Цель данной работы разработать алгоритм выбора режима плазменно-порошковой наплавки Fe-Cr-V-Mo-C покрытия оптимального с позиции производительности, требуемой геометрии, качества и износостойких свойств.

Выпускная квалификационная работа выполнена с помощью текстового редактора Microsoft Word 2016, графических редакторов Компас 3D V16, Draw и Grapher 10, расчёты выполнялись с помощью Microsoft Excel 2016, Minitab 16 и Mathcad 15. Для разработки программного обеспечения использовали Visual Basic.

## **Abstract**

Master's thesis includes: 103 pages, 13 drawings, 19 tables, 15 formulas, 20 sources.

Key words: plasma-powder surfacing, regime parameters, full factorial experiment, experiment planning, regression equation, solution search, optimization and software.

The purpose of this work is to develop an algorithm for selecting the plasma-powder surfacing mode for Fe-Cr-V-Mo-C coatings optimal from the position of productivity, the required geometry, quality and wear-resistant properties.

Graduation qualification work was done with the help of the text editor Microsoft Word 2016, graphic compasses 3D V16, Draw and Grapher 10, calculations were performed using Microsoft Exel 2016, Minitab 16 and Mathcad 15. Visual Basic was used for software development.

Оглавление	С.
Введение.....	12
1. Литературный обзор .....	14
1.1. Плазменная наплавка.....	14
1.2. Технологические параметры и особенности технологии плазменно-порошковой наплавки.....	17
1.3. Методика планирования экспериментов .....	23
1.4. Факторные эксперименты .....	26
2. Материалы и методы исследования .....	32
2.1. Нанесение порошкового покрытия .....	32
2.2. Приготовление шлифов.....	35
2.3. Травление шлифа .....	37
3. Экспериментальная часть.....	38
3.1. Планирование эксперимента .....	38
3.2. Оптимизация.....	53
3.3. Расчётное определение параметров наплавки с помощью процедуры «Поиск решения» пакета MS Excel.....	56
3.4. Программное обеспечение .....	59
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	63
4.1. Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом.....	63
4.2. Определение значимости выполняемых функций объектом .....	64
4.3. Расчёт значимости функций .....	66
4.4. Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования.....	66
4.5. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ .....	68
4.6. Оптимизация функций, выполняемых объектом .....	69
5. Социальная ответственность .....	70
5.1. Техногенная безопасность .....	71
5.2. Электробезопасность .....	77
5.3. Экологическая безопасность.....	80
5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	81
5.5. Пожарная безопасность .....	84

5.6. Организационные мероприятия обеспечения безопасности .....	87
5.7. Правовые вопросы обеспечения безопасности.....	88
Приложение А .....	90
Заключение .....	100
Список использованных источников .....	101
Презентация	
Диск DVD.....	в конверте на обороте обложки

## **Введение**

Согласно классическим представлениям оптимальным режимом процесса наплавки следует считать такой режим, который обеспечивает максимальную производительность при минимальной глубине проплавления. Но возможности повышения производительности и уменьшения доли основного металла в наплавленном покрытии, в рамках конкретных технологий наплавки и составов присадочного материала, ограничены рядом предъявляемых к упрочняющим слоям требований. Это отсутствие несплавлений, подрезов, пор и трещин, удовлетворительный внешний вид валиков, удовлетворительное микростроение зоны сплавления и покрытия в целом, однородность этого микростроения. Множество работ содержат информацию о связи основных параметров режима плазменной наплавки и геометрическими размерами покрытий, эта связь понятна и хорошо изучена.

Некоторыми авторами подчеркивается необходимость выбора режима наплавки и термической обработки, с учетом конкретных данных об их влиянии на фазовый состав и структуру наносимого сплава. Так в последнее время выполняется все больше исследований, связывающих режим плазменной наплавки, микроструктуру и свойства покрытий.

Цель настоящей работы: разработать алгоритм выбора режима плазменно-порошковой наплавки Fe-Cr-V-Mo-C покрытия оптимального с позиции производительности, требуемой геометрии, качества и износостойких свойств.

Для того чтобы достигнуть поставленную цель нужно решить ряд задач:

– Из обзора литературы определить основные параметры режима плазменно-порошковой наплавки, оказывающие наиболее сильное воздействие на размеры, микроструктуру, качество и свойства получаемых покрытий

– Получить адекватные модели, связывающие эти параметры с макро- и микроструктурными характеристиками наплавов

– Предложить характеристику покрытия по которой следует провести оптимизацию и установить граничные условия для значений остальных характеристик

– Разработать программное обеспечение, осуществляющее автоматический поиск оптимального режима наплавки.

## **1. Литературный обзор**

### **1.1. Плазменная наплавка**

Плазменная наплавка – это процесс нанесения покрытий плазменной струей. С помощью плазменной струи нагреваются поверхность восстанавливаемой детали и наносимый материал. Материал перемещается плазменной струей. Температура плазменной струи может превышать 20 000 К [1, с. 302].

При плазменной наплавке электрическая дуга сжимается стенками водоохлаждаемого сопла. Газ проходящий сквозь эту дугу, приобретает свойства плазмы – он становится ионизированным и электропроводящим. Слой газа, который соприкасается со стенками сопла, интенсивно охлаждается, утрачивает электропроводность и выполняет функции электрической и тепловой изоляции, что приводит к уменьшению диаметра плазменной струи, который составляет 0,7 диаметра сопла [1, с. 302].

В качестве плазмообразующего газа применяется аргон. Наплавка, с заменой аргона воздухом, сильно снижает стоимость восстановления. Для плазменной наплавки в воздушной среде разработаны порошковые сплавы на железной основе, в их состав входят раскислители и нитридообразующие элементы [1, с. 304].

Суть метода заключается в том, что плотность энергии, которая передается поверхности нагрева, намного больше, чем плотность открытой дуги. Это способствует тому, что скорость ввода тепла в деталь выше чем скорость теплоотдачи. Поэтому поверхность детали быстро плавится. Процесс характеризуется малым проплавлением и большим термическим КПД.

Достоинства по сравнению с другими способами нанесения покрытий сводятся к следующему:

- гладкая и ровная поверхность покрытий позволяет оставлять припуск на обработку 0,4...0,9 мм;
- малая глубина проплавления и небольшая зона термического влияния обуславливают долю основного металла в покрытии до 5 %;

- малое вложение тепла в обрабатываемую деталь обеспечивает небольшие деформации и термические воздействия на структуру и основы;
- при восстановлении обеспечивается высокая износостойкость наплавленных поверхностей;
- наблюдается снижение усталостной прочности деталей на 10...15 %, что намного меньше, чем при использовании некоторых других видов наплавки;
- возможность получения толщины наплаваемого слоя от 0,1 мм до нескольких миллиметров;
- относительно высокий КПД дуги (0.2 ...0.45) [1, с.304].

Отличные результаты при восстановлении элементов плазменной наплавкой даёт использование порошковых материалов. В таком случае:

- возможно изменять в широких пределах толщину покрытия, скорость (0,5-25 м/мин) и производительность наплавки (0,6-15 кг/ч), ширину сварного шва и состав наплаваемого металла за счет изменения применяемых материалов и режимов процесса наплавки;
- обеспечивается простота управления вводом тепла в материал детали и глубиной его проплавления независимо от подачи материала;
- облегчается выбор присадочного материала для получения покрытий (в том числе композиционных) различных составов и структур с заданными свойствами путем смешения разных порошков;
- достигается минимальный припуск на механическую обработку покрытий;
- возможна автоматизация процесса;
- обеспечивается наиболее продолжительная непрерывная работа оборудования для плазменно-порошковой наплавки по сравнению с аргонодуговой и газопламенной наплавкой [1, с.306].

Плазменная наплавка находит применение при восстановлении ответственных деталей. К таким деталям относятся: шнеки экструдеров, шнеки и сёдла задвижек, кулачковые, коленчатые и распределительные валы, валы

турбокомпрессоров, крестовины карданных шарниров, направляющие оборудования, оси и др. [1, с. 304].

Область применения – нанесение тонкослойных покрытий на нагруженные детали с небольшим износом.

При плазменной наплавке получают покрытия толщиной от 0,2 до 6 мм и шириной от 1,2 до 45 мм. Если же наносится материал, который легко плавится, тогда есть возможность нанесения покрытия с проплавлением очень тонких поверхностных слоёв без оплавления поверхности [1, с. 305].

Термический КПД наплавки в 2...3 раза выше, чем при электродуговом процессе. Производительность такого процесса от 0,4 до 5,5 кг/ч. Производительность плазменно-порошковой наплавки аустенитных нержавеющей сталей не уступает производительности электродуговой наплавки.

Плазменная наплавка с применением присадочного материала в виде порошка осуществляется несколькими способами. Очень распространённым и простым является способ наплавки по слою крупки (крупнозернистый порошок). В таком случае порошок насыпается на наплавляемую поверхность заранее, а плазменная дуга, которая горит между электродом и изделием, расплавляет его.

При наплавке с подачей порошка в сварочную ванну дуга горит между электродом и изделием. На изделии образуется ванна основного металла, куда подаётся порошок тугоплавкого металла. Способ этот применяется тогда, когда необходимо, чтобы в матрицу металла изделия были вкраплены частицы тугоплавких материалов.

Наплавка с вдуванием порошка в дугу предусматривает подачу порошка в плазменную струю, плавление его в этой струе и перенос на поверхность изделия, подогретую и оплавленную дугой прямого действия [2, с. 13].

## 1.2. Технологические параметры и особенности технологии плазменно-порошковой наплавки

Процесс плазменно-порошковой наплавки характеризуется следующими технологическими параметрами: силой тока дуги  $I$ , напряжением  $U$ , скоростью наплавки  $V_H$ , размахом колебаний плазмотрона  $R_{az}$ , частотой колебаний плазмотрона  $G$ , грануляцией порошка  $d$ , массовой скоростью подачи порошка  $V_{п}$ , плазмообразующим, транспортирующим и защитным газами и их расходом соответственно  $q_{пл}$ ,  $q_{тр}$ ,  $q_z$ , расстоянием от плазмотрона до изделия  $h$ , диаметром внутреннего  $d_{вн}$  и наружного сопел плазмотрона,  $d_n$ , температурой подогрева наплавляемой детали  $T_{под}$  [3, с. 192].

Важнейшим достоинством плазменно-порошковой наплавки является возможность обеспечить весьма малое проплавления основного металла, это уже отмечалась в первых публикациях по плазменно-порошковой наплавке [4, 5].

Авторами [6] были проведены исследования зависимости величины проплавления основного металла от наиболее важных параметров режима. Эти опыты позволили хорошо понять механизм образования наплавленного слоя при плазменно-порошковой наплавке.

Сила тока дуги прямого действия  $I_{п}$  оказывает наибольшее влияние на долю основного металла в наплавленном. Это особенно заметно при наплавке с малой массовой скоростью подачи порошка (до 2 кг/ч). При повышении скорости подачи порошка оно проявляется в меньшей степени – диапазон силы тока, который обеспечивает допустимое проплавление основного металла, расширяется.

Ток косвенной дуги  $I_k$  практически не влияет на проплавление основного металла, что хорошо согласуется с результатами calorиметрических исследований. Однако, замечено, что при слишком малом  $I_k$  снижается стабильность работы плазмотрона. При больших значениях  $I_k$  очень сильно возрастает нагрузка на плазмообразующее сопло. Поэтому существует некоторое оптимальное значение силы тока косвенной дуги, равное 70-100 А.

При увеличении расхода плазмообразующего газа  $q_{пл}$  доля основного металла в наплавленном  $Y_0$  увеличивается. Влияние  $q_{пл}$  на проплавление основного металла связано с давлением плазменной дуги на сварочную ванну, так как эффективная тепловая мощность дуги при изменении  $q_{пл}$  в исследованных пределах изменяется всего на 10-15% [6].

В то же время скорость потоков плазмы в дуге увеличивается более чем в два раза. Очевидно, что расход плазмообразующего газа при наплавке должен поддерживаться по возможности малым. Его значение выбирается из условий обеспечения устойчивости горения дуги и стабильности процесса наплавки. На практике около  $q_{пл} = 1-2$  л/мин.

Расход транспортирующего газа  $q_{тр}$  в пределах 4-9 л/мин влияет на долю основного металла в наплавленном валике  $Y_0$  аналогично плазмообразующему газу, но заметно слабее. Дальнейшее повышение  $q_{тр}$  не приводит к увеличению проплавления.

При увеличении расхода транспортирующего газа возрастают потери порошка вследствие повышения начальной скорости частиц и ухудшения условий их нагрева в дуге. При малом расходе транспортирующего газа (3-4 л/мин) процесс наплавки нарушается, так как происходит забивание каналов плазматрона порошком. Оптимальный расход транспортирующего газа в пределах 6-9 л/мин [3, с. 193].

Размах и частота колебаний плазматрона в изученных пределах ( $A = 2,5-16$  мм,  $G = 8-87$  мин<sup>-1</sup>) незначительно влияют на проплавление основного металла. Так, например, при изменении размаха колебаний в пределах 2-16 мм величина  $Y_0$  меняется в пределах 12-17%. На основании этого размах колебаний плазматрона  $R_{az}$  следует выбирать исходя из требуемой ширины наплаваемого валика, учитывая, однако, что ширина валика превышает величину  $R_{az}$  на 5-8 мм. Частота колебаний должна быть согласована со скоростью наплавки таким образом, чтобы шаг колебаний составлял от 2 до 5 мм.

При изменении расстояния от плазмотрона до изделия  $h$  в пределах 7-22 мм проплавление основного металла сохраняется практически постоянным, что является важным достоинством плазменной наплавки. Учитывая, что с увеличением расстояния  $h$  ухудшается защита сварочной ванны и возрастают потери порошка, рекомендуют поддерживать его равным 8-15 мм.

Величина  $Y_0$  в значительной степени зависит от массовой скорости подачи порошка  $V_{\text{п}}$  (при постоянных величинах остальных параметров процесса). На практике подача порошка выбирается одновременно со скоростью наплавки, поэтому влияние этих двух факторов целесообразно рассматривать совместно.

При увеличении скорости наплавки  $V_{\text{н}}$  в интервале 1,7-32 м/ч, величина которого зависит от силы тока, массовой скорости подачи порошка и размаха колебаний, доля основного металла остается почти постоянной, а затем снижается. При повышении скорости наплавки для сохранения постоянной толщины наплавленного слоя необходимо увеличить скорость подачи порошка. В этом случае для обеспечения плавления большего количества порошка необходимо также увеличивать силу тока дуги прямого действия. В результате одновременного увеличения  $V_{\text{н}}$ ,  $V_{\text{п}}$ , и  $I_{\text{п}}$  (при условии сохранения толщины наплавленного слоя) возрастает  $Y_0$ . Отсюда следует, что производительность наплавки слоя определенной толщины ограничена допустимой величиной  $Y_0$  [3, с. 194].

Выбор оптимальных режимов плазменно-порошковой наплавки сводится, в основном, к определению силы тока дуги прямого действия  $I_{\text{п}}$ , массовой скорости подачи порошка  $V_{\text{п}}$  и скорости наплавки  $V_{\text{н}}$ . Значения остальных параметров режима ( $I_{\text{к}}$ ,  $q_{\text{пл}}$ ,  $q_{\text{тр}}$ ,  $h$ ) должны поддерживаться постоянными в указанных выше пределах. Размах поперечных колебаний плазмотрона  $R_{\text{аз}}$  устанавливаются в зависимости от требуемой ширины наплавляемого валика, а частота колебаний  $G$  определяется в зависимости от скорости наплавки.

Производительность наплавки. При плазменно-порошковой наплавке с увеличением силы тока плазменной дуги производительность повышается быстрее, чем при дуговой наплавке плавящимся электродом. Если форма и размеры наплавляемой детали не ограничивают силу тока наплавки, то производительность плазменно-порошковой наплавки слоев толщиной более 3 мм ограничивается только максимально допустимым рабочим значением силы тока плазматрона и максимально возможной подачей порошка, т.е. такой подачей, при которой не забиваются каналы и сопла плазматрона.

Производительность нанесения тонких слоев в значительной мере зависит от допустимого разбавления наплавленного металла основным. Чем тоньше слой и чем меньше заданная величина  $Y_0$ , тем ниже производительность определяемая массой наплавленного металла в единицу времени.

Потери порошка. Не все частицы порошка, движущиеся по периферии столба дуги, попадают в сварочную ванну. Те из них, которые попадают на наплавляемую поверхность впереди или сбоку сварочной ванны, в результате упругого отскока от этой поверхности безвозвратно теряются. Потери порошка будут меньше, если сварочная ванна подтекает под дугу. Это наблюдается при хорошем смачивании основного металла металлом сварочной ванны, при небольшой скорости наплавки, при наплавке на спуск, при большой толщине наплавленного валика и т.д. Потери порошка возрастают, если плазматрон располагается или периодически подходит близко к кромке наплавляемой детали, если ширина подложки меньше диаметра сопла и т.д.

Отсюда следует, что потери порошка зависят от многих параметров режима:  $I_{\text{п}}$ ,  $V_{\text{н}}$ ,  $V_{\text{п}}$ ,  $q_{\text{пл}}$ ,  $q_{\text{тр}}$ ,  $d_{\text{вн}}$ ,  $d_{\text{н}}$  и др., определяющих характер движения и интенсивность плавления порошка в плазменной дуге, размеры сварочной ванны и наличие прослойки жидкого металла под дугой. Однако из перечисленных параметров на потери порошка, главным образом, влияет сила тока  $I_{\text{п}}$  и расход транспортирующего газа  $q_{\text{тр}}$ . При оптимальных режимах наплавки они не превышают 5-8% [3, с. 194].

Размеры и форму наплавленных валиков определяют в основном массовой скоростью подачи порошка, размахом поперечных колебаний плазмотрона, скоростью наплавки и током дуги прямого действия. Влияние остальных параметров незначительно.

Как показывает опыт, толщина валика при однослойной наплавке не должна превышать 5-6 мм, иначе появляются подвороты и несплавления по его краям. Минимальная толщина наплавленного слоя при  $Y_0 < 10\%$  составляет примерно 0,5 мм. Наплавка более тонких слоев (0,25-0,30 мм) практического применения не получила. Если допускается сравнительно большое проплавление основного металла, то плазменно-порошковая наплавка с малым усилением валика не представляет каких-либо трудностей.

Плазменно-порошковую наплавку, как правило, ведут с поперечными колебаниями плазмотрона, поэтому ширина валика определяется, главным образом, размахом колебаний и достигает 55-60 мм. При наплавке без колебаний ширина валика составляет 3-6 мм в зависимости от диаметра фокусирующего сопла и силы тока.

Качество наплавленного металла. Благодаря малому проплавлению и незначительному угару легирующих элементов химический состав наплавленного металла уже в первом слое соответствует составу присадочного порошка. Однородность химического состава распыленных порошков и высокая стабильность режима плазменной наплавки обеспечивают высокое качество и однородность химического состава наплавленного металла.

Для микроструктуры металла, наплавленного плазменно-порошковым методом, характерна малая ширина переходной зоны от основного металла к наплавленному. В большинстве случаев отмечается типичная для наплавленного металла ориентированная структура. Однако, изменяя соответствующим образом эффективную тепловую мощность плазменной дуги и гранулометрический состав порошка, можно подавить направленный рост столбчатых кристаллитов.

Появление в наплавленном металле пор и неметаллических включений связано либо с плохим качеством присадочного порошка, либо с неудовлетворительной защитой сварочной ванны. Специальной подготовки перед наплавкой для присадочного порошка не требуется. Необходимо только проверить гранулометрический состав порошка и просушить его, если превышен срок гарантийного хранения. Подготовка основного металла заключается в очистке наплаваемой поверхности от ржавчины и загрязнений, необходимо также не допускать чрезмерного ее окисления при подогреве перед наплавкой.

Для плазменно-порошковой наплавки характерна меньшая склонность к образованию кристаллизационных трещин, чем для дуговой наплавки плавящимся электродом, что объясняется более благоприятным термическим циклом, обусловленным, в частности, поперечными колебаниями плазмотрона.

Как правило, плазменную наплавку порошком применяют при изготовлении новых деталей, чаще всего взамен ацетилено - кислородной или аргонодуговой наплавки с присадкой прутков или ручной дуговой наплавки. Однако во многих случаях она, по-видимому, может успешно конкурировать и с механизированной дуговой наплавкой. Этот способ наплавки обеспечивает значительное (до 3-5, в некоторых случаях – до 12 раз) повышение производительности труда, снижение расхода наплавочных материалов и улучшение качества наплавленного металла.

Плазменная наплавка порошком особенно эффективна в условиях серийного производства. За рубежом ее применяют при изготовлении клапанов и седел двигателей внутреннего сгорания, деталей трубопроводной арматуры, червяков экструдеров, шнеков, деталей стекольной промышленности, опор шарошечных долот, замков и муфт бурильных труб, центраторов и других деталей бурового оборудования, ножей для резки металла, прокатных валков, штампов, прошивок, роторов смесителей, шин цепных мотопил, защитных втулок центробежных насосов, деталей паровых турбин, элементов оборудования атомных электростанций и химических предприятий [7, 8].

Плазменно-порошковую наплавку применяют также в производстве клапанов двигателей внутреннего сгорания различного назначения, начиная с клапанов двигателей легковых автомобилей (диаметр тарелки не более 30 мм) и кончая клапанами мощных судовых дизелей с диаметром тарелки более 200 мм [9-11].

### **1.3. Методика планирования экспериментов**

Планирование эксперимента – это выбор числа и условий проведения опытов, которые необходимы и достаточны для решения поставленной задачи с определённой требуемой точностью. При этом важно следующее: стремление к минимизации общего числа опытов [12, с. 14].

Под экспериментом понимается совокупность активных действий, создающих различные условия протекания изучаемого процесса с целью получения о нём информации, интересующей исследователя. Эксперимент состоит из отдельных опытов, каждый из которых проводится при некоторых постоянных условиях [12, с. 15].

Эксперимент проводят для решения таких задач как:

- интерполяционная – построение формулы для предсказаний значений изучаемого параметра, который зависит от некоторых факторов.
- экстремальная – отыскание условий процесса, которые будут обеспечивать получение оптимального значения выбранного параметра.

Для того чтобы решить эти задачи, необходимо иметь математическую модель исследуемого объекта. Для получения модели, используют результаты опытов.

Задача планирования эксперимента состоит в установлении минимально необходимого числа опытов и условий их проведения, в выборе методов математической обработки результатов опытов и в принятии решений.

При планировании эксперимента важно правильно выбрать параметр оптимизации.

Движение к оптимальному значению возможно в том случае, когда выбран один параметр оптимизации, а другие выступают в качестве

ограничений. Характеристика цели, заданная количественно – параметр оптимизации.

Планирование экстремального эксперимента требует чётко сформулированной цели исследования и её количественной оценки [13, с. 7].

Параметр оптимизации - это отклик на воздействие факторов, которые определяют поведение процесса, он должен быть:

- количественным, доступным для измерения;
- однозначным, заданному сочетанию уровней факторов должно соответствовать одно значение эксперимента;
- определённым с наибольшей точностью;
- существовать во всех состояниях исследуемого объекта;
- иметь явный физический смысл.

Факторы. Фактор - это независимая переменная величина, влияющая на параметр оптимизации. Фактор имеет некоторую область определения - это совокупность всех значений, которые может принимать фактор [13, с. 8].

Факторы должны быть:

- управляемыми, т.е. которые позволяют экспериментатору устанавливать их требуемые значения и поддерживать их постоянными в течении опыта;
- воздействующими на объект исследования;
- совместимыми, все комбинации уровней факторов должны быть осуществимы;
- независимыми, позволяющим экспериментатору устанавливать требуемые уровни любого фактора независимо от уровней других факторов.

В общем случае фактор – это размерная величина. Размерность бывает разная, и число, которое выражает величину фактора, может иметь разный порядок. В исходном виде с факторами не работают, а проводят их кодирование, оно представляет собой линейное преобразование факторного пространства.

Для того чтобы закодировать факторы нужно выбрать область эксперимента и задать верхние и нижние пределы изменения каждого фактора в ходе эксперимента  $X_{imax}$  и  $X_{imin}$ .

В кодированном виде максимальный (верхний) уровень фактора соответствует +1, а минимальный (нижний) -1, средний (основной) равен нулю.

Нулевая точка – это центр эксперимента, определяется как:

$$X_{i0} = \frac{X_{imax} + X_{imin}}{2}, \quad (1)$$

Интервал варьирования фактора  $\Delta X_i$  определяется как:

$$\Delta X_i = \frac{X_{imax} - X_{imin}}{2}, \quad (2)$$

Результаты эксперимента используют для получения математической модели исследуемого процесса.

Система математических отношений, которая описывает изучаемый процесс или явление называется математической моделью.

Под математической моделью понимают вид функции отклика  $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – это уравнение, которое связывает параметр оптимизации с факторами [13, с. 10].

Полученную математическую модель можно представить в геометрической интерпритации.

Факторное пространство – это координатное пространство, на осях которого откладывают значения факторов. Бывает, что под факторным пространством понимают многомерное пространство, образованное осями факторов и осью параметра оптимизации. Геометрический образ функции отклика в факторном пространстве называется поверхностью отклика. Если математическая модель соответствует полученным данным после реализации эксперимента она адекватна.

К исследованиям, связанным с планированием эксперимента, предъявляются высокие требования к точности измерения факторов  $X_i$  и параметров оптимизации  $y$  в каждом из опытов.

Основная задача измерений определяемых и фиксируемых величин  $X_i$  и  $y$  – оценка их погрешностей.

Есть несколько видов ошибок измерений:

- грубые;
- систематические;
- случайные.

Грубые ошибки могут возникнуть в результате изменения основных условий измерений, обычно это связано с невнимательностью исследователя. Если они обнаружены, такие результаты измерений необходимо аннулировать.

Систематические ошибки – это такие ошибки, величина которых во всех измерениях, проводящихся с помощью одних и тех же приборов и одним и тем же методом, одинакова или изменяется по определённом закону в зависимости от источника возникновения ошибок. Возникают от действия тех факторов, которые воздействуют на параметр оптимизации одинаково при многократном повторении опытов.

Случайные ошибки – это такие ошибки, которые для всех измерений, проводимых одним и тем же методом и теми же приборами, изменяются, подчиняясь некоторому определённому закону распределения. Возникают от неуправляемых факторов, не учтённых исследователем.

#### **1.4. Факторные эксперименты**

К оптимизации приступают при наличии некоторых результатов предварительных исследований изучаемого объекта. Решение задачи оптимизации начинают с выбора области эксперимента. Выбор этой области производят на основе анализа априорной информации. В области эксперимента устанавливают основные уровни и интервалы варьирования факторов.

Основным или нулевым уровнем фактора называют его значение, принятое за исходное в плане эксперимента. Основные уровни выбирают таким образом, чтобы их сочетание отвечало значению параметра оптимизации, по возможности более близкому к оптимальному. Каждое сочетание уровней

факторов является многомерной точкой в факторном пространстве. Сочетание основных уровней принимают за исходную точку для построения плана эксперимента. Построение плана эксперимента состоит в выборе экспериментальных точек, симметричных относительно исходной точки или, что одно и то же, центра плана [13, с. 11].

Предположим, что изучается влияние ряда факторов  $z_i$  на некоторую величину  $y$ . Для этого проводятся эксперименты по определённому плану, который позволяет реализовать все возможные сочетания уровней факторов. Причём каждый фактор рассматривается лишь на двух фиксированных уровнях (верхнем и нижнем). Постановка опытов по такому плану называется полным факторным экспериментом.

Если число уровней каждого фактора  $p$ , а число факторов  $k$ , то число  $N$  всех сочетаний уровней факторов, а, следовательно, и число опытов в полном факторном эксперименте, определяется выражением:

$$N = p^k, \quad (3)$$

где  $N$  – число опытов;

$p$  – число уровней факторов;

$k$  – число факторов.

Полный факторный эксперимент выполняем в следующем порядке:

- выбираем параметр оптимизации, факторы и уровни их варьирования;
- кодируем факторы;
- строим матрицу планирования в кодированных переменных с учетом парных взаимодействий и дополняем столбцом средних значений;
- вычисляем коэффициенты уравнения регрессии;
- проверяем вычисленные коэффициенты на значимость, предварительно
- определив дисперсию воспроизводимости и получаем уравнение регрессии в кодированных переменных;
- проверяем полученное уравнение на адекватность;
- выписываем уравнение регрессии в натуральных переменных.

Цель первого этапа планирования экстремального эксперимента – получение линейной модели. Он предусматривает варьирование факторов на двух уровнях. Возможное количество сочетаний уровней факторов в этом случае равно  $2^k$

Встречаются планы эксперимента типа  $2^k$  и очень редко при  $p > 3$  в связи с резким ростом числа независимых опытов  $N$ .

Широкое применение планов  $2^k$  обусловлено рациональным размещением экспериментальных точек в факторном пространстве.

План проведения экспериментов записывается в виде матрицы планирования, в которой в определенном порядке перечисляются различные комбинации факторов на двух уровнях.

При проведении экспериментов получают значения исследуемой величины  $y$  для каждого опыта (или серии опытов). Затем переходят к построению математической модели.

Под моделью понимается вид функции  $y = f(z_1, z_2, \dots, z_k)$ , которая связывает изучаемый параметр со значениями факторов, лежащих в интервале между верхним и нижним уровнями. Эту функцию называют уравнением регрессии.

Для обработки результатов проведённых экспериментов и дальнейшего определения коэффициентов уравнения регрессии факторы приводят к одному масштабу. Это достигается путём их кодирования.

После того как выбрали параметры оптимизации, факторы и уровни их варьирования, кодируют факторы.

Кодирование – это перевод натуральных значений уровней факторов в кодовые безразмерные величины с целью построения стандартной матрицы эксперимента.

Факторы кодируют по формуле:

$$X_i = \frac{z_i + z_{i0}}{\Delta z_i}, \quad (4)$$

где  $z_i$  – кодовое значение  $i$ -ого фактора;

$X_i$  – натуральное текущее значение  $i$  – ого фактора;

$z_{i0}$  – начальный (нулевой) уровень фактора или центр плана;

$\Delta z_i$  – интервал варьирования  $i$  – ого фактора.

При таком кодировании все новые переменные будут принимать значения от -1 до +1. В качестве нулевого уровня принимается центр интервала, в котором предполагается вести эксперимент.

Среднее выборочное для каждого эксперимента вычисляют по известной формуле:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{ji}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (5)$$

Линейное уравнение регрессии относительно новых переменных имеет вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k, \quad (6)$$

Если требуется изучить влияние парных взаимодействий различных факторов на исследуемый параметр, то уравнение регрессии записывают в виде:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k + b_{1,2} x_1 x_2 + b_{1,3} x_1 x_3 + \dots + b_{k-1,k} x_{k-1} x_k, \quad (7)$$

После кодирования составляют таблицу, в которой строки соответствуют опытам, а столбцы – уровням факторов. Такая таблица называется матрицей планирования эксперимента. Знаками – (нижний) и + (верхний) обозначают уровни факторов в опытах. Значения функции отклика, полученные при выполнении опытов, обозначают через  $y_1, y_2, \dots, y_k$ . Число строк матрицы равно числу опытов.

Обычно проводят несколько серий опытов для каждого эксперимента. Это необходимо для проверки уравнения на адекватность.

Адекватность – это способность модели предсказывать результаты эксперимента в некоторой области с требуемой точностью.

Результаты опытов в каждом эксперименте записывают в правые столбцы матрицы планирования. В последнем столбце записывают средние выборочные значения полученных результатов для каждой серии опытов.

Коэффициенты уравнения регрессии находят с помощью метода наименьших квадратов. Формулы, определяющие коэффициенты уравнения регрессии достаточно просты:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{y}_j, \quad (8)$$

$$b_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ji} \bar{y}_j, \quad i = \overline{1, k}, \quad (9)$$

$$b_{r,p} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{jr} x_{jp} \bar{y}_j, \quad r < p, r = \overline{1, k}, p = \overline{1, k}, \quad (10)$$

и т.д., если учитываются другие взаимодействия.

Полученные коэффициенты необходимо проверить на значимость. Это можно сделать с помощью критерия Стьюдента: если  $|b| > t_{кр} * S_{коэфф.}$ , то  $b$  значим; если  $|b| < t_{кр} * S_{коэфф.}$ , то  $b$  не значим и его принимают равным нулю в уравнении регрессии.

Критическую точку  $t_{кр}$  находят из таблиц распределения Стьюдента по числу степеней свободы  $n \cdot (m - 1)$  и с заданным уровнем значимости  $\alpha$  для случая двусторонней критической области.

Среднее квадратическое отклонение коэффициентов  $S_{коэфф.}$  Зависит от дисперсии воспроизводимости результатов по всем проведённым опытам  $S_{\{y\}}^2$  и вычисляется по формуле:

$$S_{коэфф.} = \sqrt{\frac{S_{\{y\}}^2}{n * m}}, \quad (11)$$

Дисперсия воспроизводимости  $S_{\{y\}}^2$  характеризует ошибку всего эксперимента. В случае равномерного дублирования опытов для расчёта  $S_{\{y\}}^2$  используют формулу:

$$S_{ост}^2 = \frac{1}{n * (m - 1)} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_j)^2, \quad (12)$$

Где  $n$  – число экспериментов;

$m$  – число опытов (наблюдений) в каждом эксперименте;

$y_{ji}$ - результат отдельного  $i$  - ого наблюдения в  $j$  - ом эксперименте;

$\bar{y}_j$ - среднее выборочное значение наблюдений для  $j$  – ого эксперимента.

Проверка на адекватность полученного уравнения регрессии со значимыми коэффициентами осуществляется с помощью критерия Фишера: если  $F_{\text{расч.}} < F_{\text{табл.}}$ , то уравнение адекватно, в противном случае – неадекватно.

Расчётное значение критерия  $F_{\text{расч.}}$  определяют по формуле:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ост.}}^2}{S_{\{y\}}^2}, \quad (13)$$

где  $S_{\{y\}}^2$  – дисперсия воспроизводимости, а  $S_{\text{ост.}}^2$  – остаточная дисперсия (или дисперсия адекватности).

Остаточная дисперсия  $S_{\text{ост.}}^2$  вычисляется следующим образом:

$$S_{\text{ост.}}^2 = \frac{m}{n - r} \sum_{j=1}^n (\tilde{y}_j - \bar{y}_j)^2, \quad (14)$$

где  $n$  – число экспериментов;

$m$  – число опытов в каждом эксперименте;

$r$  – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии;

$\tilde{y}_j$  – значение изучаемого параметра, вычисленное по уравнению регрессии со значимыми коэффициентами для  $j$  – ого эксперимента;

$\bar{y}_j$  – среднее выборочное значение наблюдений для  $j$  – ого эксперимента.

Табличное значение критерия  $F_{\text{табл.}}$  Находят из таблиц критических точек распределения Фишера по соответствующим степеням свободы  $k_1 = n - r$ ,  $k_2 = n \cdot (m - 1)$  и заданному уровню значимости  $\alpha$ .

Анализ результатов предполагает интерпретацию полученной модели. Интерпретацию модели можно производить только тогда, когда она записана в кодированных переменных. Только в этом случае на коэффициенты не влияет масштаб факторов, и мы можем по величине коэффициентов судить о степени влияния того или иного фактора. Чем больше абсолютная величина

коэффициента, тем больше фактор влияет на изучаемый параметр. Следовательно, можно расположить факторы по величине их влияния. Знак «плюс» у коэффициента свидетельствует о том, что с увеличением значения фактора растёт величина изучаемого параметра, а при знаке «минус» - убывает.

Для получения математической модели в натуральных переменных  $z_i$  в уравнение регрессии вместо  $x_i$  необходимо подставить их выражения из формулы:

$$x_i = \frac{z_i - z_i^0}{\gamma_i}, \quad (15)$$

$z_i^0$  - называют центр плана,  $\gamma_i$  – интервалом варьирования.

При переходе к натуральным переменным коэффициенты уравнения изменяются, и в этом случае пропадает возможность интерпретации влияния факторов по величинам и знакам коэффициентов. Однако, если уравнение адекватно, то с его помощью можно определять значения исследуемой величины, не проводя эксперимента и придавая факторам значения, которые должны лежать между нижним и верхним уровнем.

## **2. Материалы и методы исследования**

### **2.1. Нанесение порошкового покрытия**

В качестве наплавляемого материала в работе использовался промышленный порошок ПР-Х18ФНМ, фракцией от 50 до 200 мкм, следующего химического состава (%): 2,1...2,4 С, 17...19 Cr, 2...3 Ni, 7...8 V, 2...2,6 Мо, Fe – основа. В качестве основного материала использовали пластины из стали 20 размером 250x100x10 мм, поверхность которых предварительно шлифовалась.

Покрyтия наносили на установке УПН-303УХЛ4 с водоохлаждаемым плазмотроном, серийно выпускавшейся в ВНИИЭСО. В работе использовали плазматрон с внутренней схемой ввода порошка в дугу. Для более высокого уровня защиты создаваемых упрочняющих слоёв от вредного влияния атмосферного воздуха на плазматрон устанавливали устройство

дополнительного обдува зоны наплавки. В качестве плазмообразующего, транспортирующего и защитного газов применяли аргон высшего сорта.

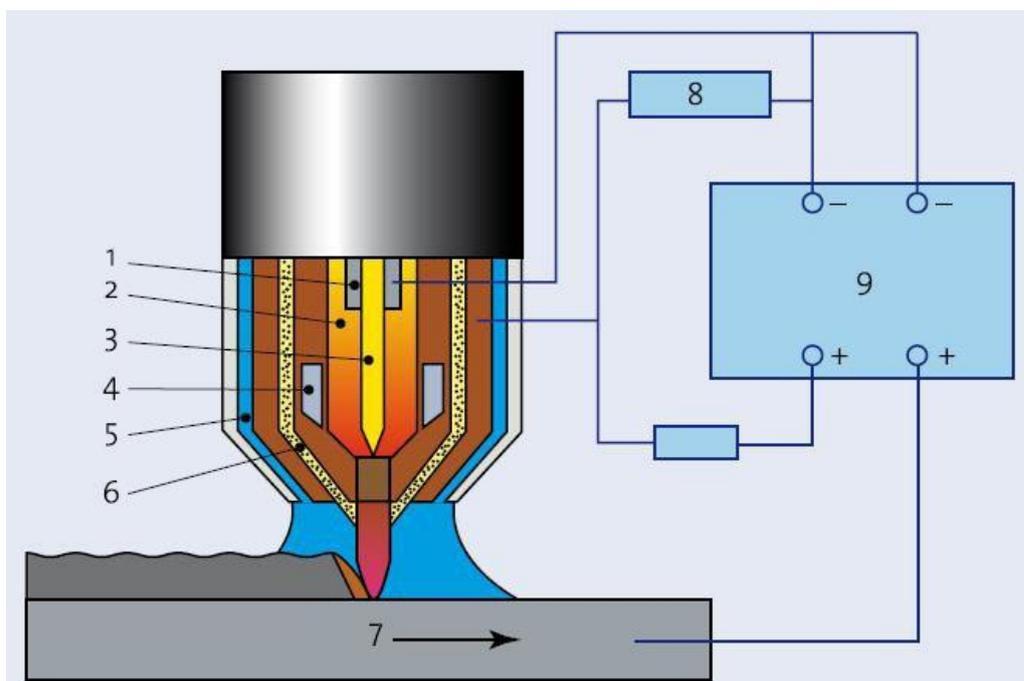


Рисунок 1 – Принципиальная схема плазменно-порошковой наплавки (1 – устройство держателя катода; 2 – газ плазмы; 3 – Катод; 4 – Охлаждающая жидкость; 5 – Защитный газ; 6 – Транспортирующий газ и порошок; 7 – Направление тока основной дуги; 8 – Пилотная дуга; 9 – Два контура электропитания)

Преимущества данного способа наплавки:

- Минимальное перемешивание металла;
- Минимальное тепловложение в деталь;
- Полный контроль над дугой плазмы;
- Получение гладких покрытий с минимальной механической обработкой;
- Максимальная чистота наплавленного слоя;
- Получение покрытий без пор и раковин;
- Высокая прочность соединения.

Таблица 1 – Экспериментальные режимы плазменно-порошковой наплавки (ниточными валиками)

№ опыта	Режим наплавки		
	Сила тока I, А	Скорость наплавки $V_H$ , м/ч	Скорость подачи присадочного порошка $V_H$ , кг/ч
1	260	13	2,2
2	220	13	2,2
3	260	6	2,2
4	220	6	2,2
5	260	13	1,1
6	220	13	1,1
7	260	6	1,1
8	220	6	1,1

Таблица 2 – Экспериментальные режимы плазменно-порошковой наплавки (широкослойная наплавка)

№ опыта	Режим наплавки				
	Сила тока I, А	Размах колебаний $R_{az}$ , мм	Частота колебаний G, Гц	Скорость подачи присадочного порошка $V_H$ , кг/ч	Скорость наплавки $V_H$ , м/ч
1	220	10	0,5	2,2	4,5
2	260	10	0,5	2,2	4,5
3	220	20	0,5	2,2	4,5
4	260	20	0,5	2,2	4,5
5	220	10	0,25	2,2	4,5
6	260	10	0,25	2,2	4,5
7	220	20	0,25	2,2	4,5
8	260	20	0,25	2,2	4,5
9	220	10	0,5	0,7	4,5
10	260	10	0,5	0,7	4,5
11	220	20	0,5	0,7	4,5
12	260	20	0,5	0,7	4,5
13	220	10	0,25	0,7	4,5
14	260	10	0,25	0,7	4,5
15	220	20	0,25	0,7	4,5
16	260	20	0,25	0,7	4,5

## 2.2. Приготовление шлифов

Изготовление шлифов состоит из нескольких этапов.

Окончательная поверхность шлифа должна быть плоской и зеркальной, без видимых дефектов (царапин, задигов). Если не соблюдать технологию изготовления шлифа невозможно будет судить о реальной структуре металла, изображение шлифа под микроскопом будет искажено, не получится обеспечить его резкость, так как собственная глубина резкости микроскопа способна обеспечить резкость изображения только ограниченного диапазона высоты. Оставшиеся части изображения затем расплываются. По этой причине приготовление шлифов разделяется на этапы, которые выполняются в чёткой последовательности и никак иначе.

Первый этап. Отрезка шлифа. Отрезка образца производилась на отрезном станке МЕСАТОМЕ Т260. Тиски станка позволяют закреплять образцы в горизонтальном и вертикальном положениях. Станок имеет две скорости резки: 3200 и 3800 об/мин.



Рисунок 2 – Станок Mecatome T260

Далее исследуемую поверхность образца заторцовывали на плоскость на наждачном круге. Отрезку и заторцовку образца обязательно необходимо вести с охлаждением водой, иначе он нагреется, что приведёт к искажению структуры металла.

Второй этап. Шлифование образца. После заторцовки производим шлифование образца на плотной бумаге с применением алмазных паст (ГОСТ 25593) разных номеров (зернистость красной пасты 60/40, голубой пасты 28/20 и зеленой пасты 10/7).

Шлифование выполняется вручную следующим образом. Начинаем шлифование на пасте с более крупными абразивными частицами и заканчиваем пастой с более мелкими частицами. Прижимаем образец заторцованной поверхностью к бумаге с пастой, водим в одном направлении, пока все риски не будут соответствовать направлению шлифования. Затем шлифуем на пасте с более мелкими частицами абразива в перпендикулярном направлении к тем рискам, которые у нас получились на предыдущей пасте, пока они не исчезнут. Если не соблюдать данную последовательность шлифования останутся риски, которые не выводятся при полировании и затрудняют дальнейший анализ микроструктуры образца. При переходе на следующий номер пасты необходимо полностью удалить остатки старой пасты предыдущего номера (промыть, вытереть тканью со спиртом и протереть сухой ветошью).

Важным в процессе изготовления шлифа является то, чтобы заторцованная и отшлифованная поверхность получилась идеально плоской, края не должны быть завалены. Для достижения такого результата при изготовлении образец зажимали в струбцину, которая имеет ту же твердость, что и шлиф. После окончания шлифования образец промывали водой для удаления частиц абразивного материала, затем полировали.

Третий этап. Полирование выполнялось на плоском круге, который вращался с помощью двигателя. Круг покрыт сукном, которое в процессе полирования нужно смачивать водой с мельчайшим порошком, пастой ГОИ, для лучшего выведения царапин и ускорения процесса. В процессе полирования образец прижимается к кругу равномерно всей плоскостью. Во время полирования образец нужно постоянно поворачивать. Прекращается полирование после того как выведены все оставшиеся риски и поверхность образца имеет зеркальный блеск.

### 2.3. Травление шлифа

Травление выполняли следующим образом. Полностью подготовленный образец определённое время выдерживали в специальном растворе - «травитель», затем шлиф промывали сначала водой, а затем спиртом и сушили. В результате травления на поверхности микрошлифа образовывались выступы и впадины, характеризующие микроструктуру сплава. В нетравленном виде полированный шлиф под микроскопом имеет вид светлого круга.

Для анализа эвтектических карбидов использовали травитель следующего химического состава: 20 мл. HCl; 1 мг. CuCl<sub>2</sub>; 15 мл. H<sub>2</sub>O; 65 мл. C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O. Травление проводили при температуре 20 °С, время травления 60 с.

Микроструктуру наплавленных покрытий исследовали с помощью оптического микроскопа Olympus GX51, снабженного анализатором изображений SIAMS 700.



Рисунок 3 – Микроскоп Olympus GX51

### 3. Экспериментальная часть

#### 3.1. Планирование эксперимента

Основными параметрами режима плазменно-порошковой наплавки являются сила тока дуги  $I$ , напряжение  $U$ , скорость наплавки  $V_H$ , размах колебаний плазматрона  $R_{az}$ , частота колебаний плазматрона  $G$ , грануляция порошка  $d$ , массовая скорость подачи порошка  $V_{п}$ , плазмообразующий, транспортирующий и защитный газы и их расход соответственно  $q_{пл}$ ,  $q_{тр}$ ,  $q_з$ , расстояние от плазматрона до изделия  $h$ , диаметр внутреннего  $d_{вн}$  и наружного сопел плазматрона,  $d_n$ , температура подогрева наплавляемой детали  $T_{под}$ .

При наплавке одиночными валиками наибольшее влияние на строение наплавленного слоя оказывают сила тока  $I(z_1)$ , скорость наплавки  $V_H(z_2)$  и скорость подачи присадочного порошка  $V_{п}(z_3)$ . Поэтому при поиске оптимального режима формирования упрочняющего слоя без поперечных колебаний плазматрона (наплавка ниточными валиками) обычно именно они выступают в качестве варьируемых, а остальные устанавливают постоянными в пределах рекомендуемых диапазонов.

В случае поиска оптимального режима формирования упрочняющего слоя с поперечными колебаниями плазматрона (широкослойная наплавка), в качестве варьируемых выступают следующие параметры: сила тока  $I(z_1)$ , размах ( $z_2$ ), частота колебаний ( $z_3$ ), скорость подачи присадочного порошка ( $z_4$ ).

Для установления зависимости параметров микроструктуры от основных параметров режима наплавки был выбран полный факторный эксперимент типа  $2^3$ .

Поиск оптимальных параметров осуществляли в интервале токов от 220 до 260 А, скорость наплавки изменяли в диапазоне от 6 до 13 м/ч, а расход присадочного порошка задавали в пределах от 1,1 до 2,2 кг/ч для случая без поперечных колебаний плазматрона (наплавка ниточными валиками) и в интервале токов от 220 до 260 А с размахом от 10 до 20 мм, частотой от 0,25 до

0,5 Гц и расходом присадочного порошка от 0,7 до 2,2 кг/ч для случая с колебаниями (широкослойная наплавка).

В качестве параметров оптимизации в работе выступают следующие параметры макро- и микроструктуры:

а) макроструктурные

- ширина ( $B$ , мм);
- высота наплавленного слоя ( $H$ , мм);
- доля участия основного металла в наплавленном покрытии ( $Y_o$ , %);
- площадь наплавленного металла ( $F_n$ , мм<sup>2</sup>).

б) микроструктурные

- объёмная доля частиц карбида ванадия ( $V_{vc}$ , %);
- фактор формы частиц ( $f$ );
- диаметр частиц ( $d$ , мкм);
- число частиц ( $N$ , шт.);
- объёмная доля эвтектики карбида  $Cr_7C_3$  ( $V_{Cr_7C_3}$ , %).

Обработку результатов эксперимента проводим в соответствии с рекомендациями [13] в несколько этапов.

Этап 1. Для каждого фактора были найдены центр, интервал варьирования и зависимость кодированной переменной  $x_i$  от натуральной  $z_i$  по формулам (1,2,4). Результаты оформлены в таблице 3.

Таблица 3 – Центр, интервал варьирования и зависимость кодированной переменной  $x_i$  от натуральной  $z_i$  (наплавка ниточными валиками).

Факторы	Верхний уровень $z^+$	Центр $z^0$	Нижний уровень $z^-$	Интервал	Зависимость кодированной переменной от натуральной
Сила тока I, А – $z_1$	260	240	220	20	$x_1 = \frac{z_1 - 240}{20}$
Скорость наплавки $V_n$ , м/ч – $z_2$	13	9,5	6	3,5	$x_2 = \frac{z_2 - 9,5}{3,5}$
Скорость подачи присадочного порошка $V_p$ , кг/ч – $z_3$	2,2	1,65	1,1	0,55	$x_3 = \frac{z_3 - 1,65}{0,55}$

Таблица 4 – Центр, интервал варьирования и зависимость кодированной переменной  $x_i$  от натуральной  $z_i$  (широкослойная наплавка).

Факторы	Верхний уровень $z^+$	Центр $z^0$	Нижний уровень $z^-$	Интервал	Зависимость кодированной переменной от натуральной
Сила тока I, А – $z_1$	260	240	220	20	$x_1 = \frac{z_1 - 240}{20}$
Размах колебаний $R_{az}$ , мм – $z_2$	20	15	10	5	$x_2 = \frac{z_2 - 15}{5}$
Частота колебаний G, Гц – $z_3$	0,5	0,375	0,25	0,125	$x_3 = \frac{z_3 - 0,38}{0,125}$
Скорость подачи присадочного порошка $V_p$ , кг/ч – $z_4$	2,2	1,45	0,7	0,75	$x_4 = \frac{z_4 - 1,45}{0,75}$

Этап 2. По формуле (5) были рассчитаны средние выборочные результатов для каждого эксперимента.

С учетом всех взаимодействий и средних значений отклика были построены матрицы планирования – таблица 5 и таблица 6.

Таблица 5 – Матрица планирования для обработки результатов (наплавка ниточными валиками)

N Опы та	Факторы			Взаимодействия				Среднее результата экспериментов									
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	B	H	$Y_0$	$F_H$	$V_{vc}$	$f$	$d$	$N$	$V_{Cr7C3}$	
1	+	+	+	+	+	+	+	8,3	2,6	4,9	17,9	13,2	0,795	1,31	772	28	
2	-	+	+	-	-	+	-	6,4	3,085	1,5	14,8	12,925	0,8135	1,375	672,5	39,2	
3	+	-	+	-	+	-	-	13,1	4,35	11	44,5	9,5	0,76	1,84	248	23,6	
4	-	-	+	+	-	-	+	10,6	4,55	4,3	36	11	0,78	1,62	390	34	
5	+	+	-	+	-	-	-	8,4	1,715	16,5	9,9	9,5	0,78	1,2	620	18	
6	-	+	-	-	+	-	+	6,7	1,815	5	8,4	12,5	0,79	1,265	794,5	29,6	
7	+	-	-	-	-	+	+	15,1	2,425	30	23,7	7	0,669808	1,55	226	11,5	

8	-	-	-	+	+	+	-	11, 3	2,6 5	22, 7	19, 8	8,7	0,7	1,6 6	340	19,6
---	---	---	---	---	---	---	---	----------	----------	----------	----------	-----	-----	----------	-----	------

Таблица 6 – Матрица планирования для обработки результатов  
(широкослойная наплавка)

№ Опыта	Факторы				Взаимодействия											
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_1x_4$	$x_2x_3$	$x_2x_4$	$x_3x_4$	$x_1x_2x_3$	$x_1x_2x_4$	$x_2x_3x_4$	$x_1x_3x_4$	$x_1x_2x_3x_4$	
1	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	
2	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	-	+	-	
3	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	+	-	-	
4	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
5	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	
6	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	-	+	
7	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	-	+	+	
8	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	
9	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	
10	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	+	-	+	
11	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	
12	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	
13	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	
14	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	-	
15	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	
16	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	

Продолжение таблицы 6

№ Опыта	Среднее результата экспериментов								
	B	H	$Y_o$	$F_H$	$V_{vc}$	$f$	$d$	$N$	$V_{Cr7C3}$
1	15	4,6	3	53	10,6	0,79	1,45	470	38,3
2	19,15	3,75	8,5	57,2	10,3	0,77	1,55	389	26,7
3	23,25	3	3	52,5	11	0,8	1,45	540	38
4	25	2,95	8	54,3	11	0,78	1,42	535,5	29
5	15,3	4,5	3	52,5	10,5	0,79	1,4	500	34,5
6	18,15	3,95	7,5	57	10	0,78	1,5	431	31
7	23,8	3,1	3	52,5	10,8	0,8	1,4	543	38,6
8	25	2,75	11	55	10,2	0,79	1,3	565,5	28,9
9	16,2	1,6	27,5	17,5	8	0,76	1,43	383	16,6
10	18,65	1,65	38	20	6,1	0,74	1,53	267	8,5
11	22,3	1,15	30	16,5	7,4	0,8	1,2	508	8,5
12	24,7	1,2	48	21	4,5	0,75	1,34	248,5	4,9
13	16,25	1,65	29	17,95	8	0,76	1,4	376,5	16
14	19,4	1,7	42	23	5,9	0,75	1,58	252,5	7,8
15	22,7	1,1	37	17,5	7	0,81	1,17	486,5	7,6
16	25,5	1,15	50	23,5	3,3	0,78	1,24	224	3,5

Этап 3. Были рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии по формуле (10).

Этап 4. Найдена дисперсия воспроизводимости  $S_{\{y\}}^2$ . Для облегчения расчётов формула (12) записана в другом виде:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{n(m-1)} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_j)^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left( \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_{ji} - y_i)^2 \right) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j^2$$

здесь внутренние суммы  $S_j^2$  являются выборочными дисперсиями результатов опытов для  $j$ -ого эксперимента.

Этап 5. По формуле (11) определено среднее квадратическое отклонение коэффициентов.

Этап 6. Проверка значимости коэффициентов регрессии. Это можно сделать с помощью критерия Стьюдента: если  $|b| > t_{кр} * S_{коэфф.}$ , то  $b$  значим; если  $|b| < t_{кр} * S_{коэфф.}$ , то  $b$  не значим и его принимают равным нулю в уравнении регрессии.

Критическую точку  $t_{кр}$  находят из таблиц распределения Стьюдента по числу степеней свободы  $n (m-1)$  и с заданным уровнем значимости  $\alpha$  для случая двусторонней критической области.

Этап 7. Записываем уравнение регрессии в кодированных переменных.

Этап 8. Проверка на адекватность полученного уравнения регрессии со значимыми коэффициентами с помощью критерия Фишера по формуле (13): если  $F_{расч.} < F_{табл.}$ , то уравнение адекватно, в противном случае – неадекватно. Так как дисперсия воспроизводимости найдена в предыдущем пункте, то для определения расчётного значения критерия  $F_{расч.}$  необходимо вычислить остаточную дисперсию  $S_{ост.}^2$ .

Этап 9. Вычисляем остаточную дисперсию  $S_{ост.}^2$  по формуле (14).

Этап 10. Интерпретация полученной модели в кодированных переменных.

Этап 11. Раскодируем уравнение. Выписываем уравнение регрессии в натуральных переменных, подставляя вместо  $x_i$  их выражения через  $z_i$ , которые берём из последнего столбца таблицы 3 и 4. Преобразовав это уравнение, окончательно получаем его вид в натуральных переменных.

В результате обработки экспериментальных данных был получен ряд уравнений регрессии, связывающих параметр оптимизации с факторами.

Таблица 7 – Уравнения регрессии для эксперимента без поперечных колебаний плазматрона (наплавка ниточными валиками).

Параметр оптимизации	Уравнение с закодированными факторами (только значимые коэффициенты)	Раскодированное уравнение в натуральных переменных
1) Диаметр частиц карбида ванадия	$y = 1,4775 - 0,19 * x_2 + 0,0588 * x_3$	$y = 1,81696 - 0,05429 * V_H + 0,10682 * V_\Pi$
2) Доля эвтектики на основе карбида Cr7C3	$y = 25,438 - 5,162 * x_1 + 3,262 * x_2 + 5,763 * x_3$	$y = 61,2446 - 0,25813 * I + 0,93214 * V_H + 10,4773 * V_\Pi$
3) Фактор формы частиц карбида ванадия	$y = 0,76106 - 0,00981 * x_1 + 0,03356 * x_2 + 0,02606 * x_3 - 0,01644 * x_2 * x_3$	$y = 0,57568 - 0,000490625 * I + 0,02368 * V_H + 0,12851 * V_\Pi - 0,00854 * V_H * V_\Pi$
4) Высота валика	$y = 2,8988 - 0,1262 * x_1 - 0,5950 * x_2 + 0,7475 * x_3 - 0,2088 * x_2 * x_3$	$y = 2,08643 - 0,00631 * I + 0,00893 * V_H + 2,38929 * V_\Pi - 0,10844 * V_H * V_\Pi$
5) Ширина валика	$y = 9,988 - 1,237 * x_1 - 2,537 * x_2$	$y = 2,02500 + 0,06188 * I - 0,725 * V_H$

6) Доля основного металла в наплавленном покрытии	$y = 12,031 + 3,656 * x_1 - 4,969 * x_2 - 6,606 * x_3 + 2,744 * x_2 * x_3$	$y = 23,8036 + 0,182813 * I - 3,77143 * V_H - 25,5519 * V_{II} + 1,42532 * V_H * V_{II}$
7) Площадь наплавленного металла	$y = 21,875 + 2,125 * x_1 - 9,125 * x_2 + 6,425 * x_3 - 0,975 * x_1 * x_2 - 2,825 * x_2 * x_3$	$y = -52,8929 + 0,23857 * I + 3,15714 * V_H + 25,6234 * V_{II} - 0,01393 * I * V_H - 1,46753 * V_H * V_{II}$
8) Объёмная доля частиц карбида ванадия	$y = 10,5406 - 0,7406 * x_1 + 1,4906 * x_2 + 1,1156 * x_3 + 0,4344 * x_1 * x_3$	$y = 27,6728 - 0,10219 * I + 0,42589 * V_H - 7,44886 * V_{II} + 0,03949 * I * V_{II}$
9) Число частиц карбида ванадия	$y = 507,875 - 41,375 * x_1 - 206,875 * x_2 + 22,625 * x_1 * x_2 + 30,75 * x_1 * x_3 + 37,75 * x_1 * x_2 * x_3$	$y = -1401,92857 + 5,61786 * I + 369,82 * V_H + 1564,68 * V_{II} - 1,29 * I * V_H - 6,52 * I * V_{II} - 235,32 * V_H * V_{II} + 0,98 * I * V_H * V_{II}$

Таблица 8 – Уравнения регрессии для эксперимента с поперечными колебаниями плазматрона (широкослойная наплавка).

Параметр оптимизации	Уравнение с закодированными факторами (только значимые коэффициенты)	Раскодированное уравнение в натуральных переменных
1) Ширина валика	$y = 20,7281 + 1,3781 * x_1 + 3,4656 * x_2$	$y = -5,06875 + 0,06484 * I + 0,67688 * R_{az}$
2) Высота валика	$y = 2,5719 - 0,0844 * x_1 - 0,4156 * x_2 + 1,0219 * x_4 - 0,1219 * x_1 * x_4 - 0,2281 * x_2 * x_4$	$y = -1,29 + 0,00756 * I + 0,0051 * R_{az} + 4,225 * V_{\Pi} - 0,00813 * I * V_{\Pi} - 0,06 * R_{az} * V_{\Pi}$
3) Доля основного металла в наплавленном покрытии	$y = 21,44 + 4,78 * x_1 + 2,19 * x_2 - 1,26 * x_3 - 14,66 * x_4 - 1,87 * x_1 * x_4$	$y = -53,7633 + 0,419708 * I + 0,43875 * R_{az} - 10,05 * G + 10,3583 * V_{\Pi} - 0,124583 * I * V_{\Pi}$
4) Площадь наплавленного металла	$y = 37,212 + 1,5 * x_1 + 16,812 * x_4$	$y = -13,2917 + 0,075 * I + 22,4167 * V_{\Pi}$
5) Фактор формы частиц карбида ванадия	$y = 0,77813 - 0,01063 * x_1 + 0,01063 * x_2 - 0,00843 * x_3 + 0,00938 * x_4 - 0,00563 * x_2 * x_4$	$y = 0,836125 - 0,00053125 * I + 0,0043 * R_{az} - 0,035 * G + 0,035 * V_{\Pi} - 0,0015 * R_{az} * V_{\Pi}$

6) Число частиц карбида ванадия	$y = 427,38 - 61,87 * x_1 + 43,62 * x_2 + 84,12 * x_4 + 33,37 * x_1 * x_4 + 20,13 * x_2 * x_4$	$y = 1767,38 - 6,32 * I + 0,94333 * R_{az} - 502,333 * V_{\Pi} + 2,225 * I * V_{\Pi} + 5,36667 * R_{az} * V_{\Pi}$
7) Диаметр частиц карбида ванадия	$y = 1,39500 + 0,03750 * x_1 - 0,0863 * x_2 + 0,033 * x_4 - 0,0225 * x_1 * x_4 + 0,04375 * x_2 * x_4$	$y = -0,865667 + 0,00405 * I - 0,0337 * R_{az} + 0,238333 * V_{\Pi} - 0,0015 * I * V_{\Pi} + 0,011 * R_{az} * V_{\Pi}$
8) Доля эвтектики на основе карбида Cr7C3	$y = 21,087 - 3,675 * x_1 - 1,213 * x_2 + 11,912 * x_4 + 1,837 * x_2 * x_4$	$y = 56,4517 - 0,18375 * I - 0,9530 * R_{az} + 8,533 * V_{\Pi} + 0,49 * R_{az} * V_{\Pi}$
9) Доля частиц карбида ванадия	$y = 8,3531 - 0,7469 * x_1 - 0,3219 * x_2 + 2,1406 * x_4 + 0,5156 * x_1 * x_4 + 0,4656 * x_2 * x_4$	$y = 28,8058 - 0,0871875 * I - 0,2444417 * R_{az} - 7,25833 * V_{\Pi} + 0,034375 * I * V_{\Pi} + 0,124167 * R_{az} * V_{\Pi}$

Полученные уравнения регрессии в закодированном виде позволяют определить силу влияния факторов на величину функций отклика. Знак коэффициента указывает на прямую, или обратную связь фактора с функцией отклика. Отсутствие в уравнениях тех или иных факторов указывает на их незначимость.

Таблица 9 – Оценка адекватности полученных уравнений регрессии.

Наплавка ниточными валиками

Параметр оптимизации	$F_{\text{табл.}}$	$F_{\text{расч.}}$	Сравнение	Результат оценки адекватности
1) Ширина валика	3,69	1,27232	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно
2) Высота валика	4,07	2,75026	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно
3) Доля основного металла в наплавленном покрытии	4,07	1,74266	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно
4) Площадь наплавленного металла	4,46	2,222	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно
5) Фактор формы частиц VC	4,07	0,4205	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно
6) Объёмная доля частиц VC	4,46	0,2	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно
7) Диаметр частиц VC	4,07	1,434	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно
8) Число частиц VC	4,46	1,0881	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно
9) Объёмная доля эвтектики на основе карбида $\text{Cr}_7\text{C}_3$	3,84	1,0427	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно

Таблица 10 – Оценка адекватности полученных уравнений регрессии.

Широкослойная наплавка

Параметр оптимизации	$F_{\text{табл.}}$	$F_{\text{расч.}}$	Сравнение	Результат оценки адекватности
1) Ширина валика	2,40	0,977	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно
2) Высота валика	2,49	1,16	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно
3) Доля основного металла в наплавленном покрытии	2,42	1,2811	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно
4) Площадь наплавленного металла	2,42	1,2753	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно
5) Фактор формы частиц VC	2,49	1,4057	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно
6) Объёмная доля частиц VC	2,42	1,19	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно
7) Диаметр частиц VC	2,49	1,8181	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно
8) Число частиц VC	2,49	1,2457	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно
9) Объёмная доля эвтектики на основе карбида Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	2,42	1,3751	$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$	Уравнение адекватно

Таблица 11 – Направления для изменения факторов и отклика для уравнений регрессии. Наплавка ниточными валиками

Функция–отклик	Направление изменения отклика	Направление изменения факторов			
		Сила тока	Скорость наплавки	Скорость подачи порошка	
Макроразмеры	Ширина валика	↑	↑	↓	-
	Высота валика	↑	↓	↓	↑
	Площадь наплавленного металла	↑	↑	↓	↑
	Доля основного металла в наплавленном покрытии	↓	↓	↑	↑
Микростроение	Объемная доля частиц VC	↑	↓	↑	↑
	Фактор формы частиц VC	↑	↓	↑	↑
	Диаметр частиц VC	↓	-	↑	↓
	Объемная доля эвтектики на основе карбида Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	↑	↓	↑	↑

Таблица 12 – Направления для изменения факторов и отклика для уравнений регрессии. Широкойнаплавка

Функция–отклик		Направление изменения отклика	Направление изменения факторов			
			Сила тока	Скорость подачи порошка	Размах колебаний	Частота
Макроразмеры	Ширина валика	↑	↑	-	↑	-
	Высота валика	↑	↓	↑	↓	-
	Площадь наплавленного металла	↑	↑	↑	-	-
	Доля основного металла в наплавленном покрытии	↓	↓	↑	↓	↑
Микростроение	Объемная доля частиц VC	↑	↓	↑	↓	-
	Фактор формы частиц VC	↑	↑	↑	↓	↓
	Диаметр частиц VC	↓	↓	↓	↑	-
	Объемная доля эвтектики на основе карбида Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	↑	↓	↑	↓	-

Проведя анализ полученных уравнений регрессии можно заметить, что некоторые параметры макро- и микроструктуры коррелируют между собой (статистически связаны друг с другом). Изменение значения одной из этих величин сопутствует систематическому изменению значения другой величины. Таким образом, для получения значения того или иного параметра, достаточно вычислить один, а значение коррелирующего с ним параметра предсказать с некоторой точностью. Такой корреляционный анализ может уменьшить количество уравнений регрессии в системе.

### 3.2. Оптимизация

Для разработки алгоритма выбора параметров режима плазменно-порошковой наплавки Fe-Cr-V-Mo-C сплавов необходимы модели, описывающие влияние параметров процесса наплавки на геометрические размеры валика и металлографические характеристики сварного соединения.

Таблица 13 – Уравнения регрессии (модели)

Наплавка ниточными валиками	Широкослойная наплавка
$d = 1,81696 - 0,05429 * V_H + 0,10682 * V_{II}$	$d = -0,865667 + 0,00405 * I - 0,0337 * R_{az} + 0,238333 * V_{II} - 0,0015 * I * V_{II} + 0,011 * R_{az} * V_{II}$
$V_{Cr7C3} = 61,2446 - 0,25813 * I + 0,93214 * V_H + 10,4773 * V_{II}$	$V_{Cr7C3} = 56,4517 - 0,18375 * I - 0,9530 * R_{az} + 8,533 * V_{II} + 0,49 * R_{az} * V_{II}$
$f = 0,57568 - 0,000490625 * I + 0,02368 * V_H + 0,12851 * V_{II} - 0,00854 * V_H * V_{II}$	$f = 0,836125 - 0,00053125 * I + 0,0043 * R_{az} - 0,035 * G + 0,035 * V_{II} - 0,0015 * R_{az} * V_{II}$
$H = 2,08643 - 0,00631 * I + 0,00893 * V_H + 2,38929 * V_{II} - 0,10844 * V_H * V_{II}$	$H = -1,29 + 0,00756 * I + 0,0051 * R_{az} + 4,225 * V_{II} - 0,00813 * I * V_{II} - 0,06 * R_{az} * V_{II}$
$B = 2,02500 + 0,06188 * I - 0,725 * V_H$	$B = -5,06875 + 0,06484 * I + 0,67688 * R_{az}$
$Y_o = 23,8036 + 0,182813 * I - 3,77143 * V_H - 25,5519 * V_{II} + 1,42532 * V_H * V_{II}$	$Y_o = -53,7633 + 0,419708 * I + 0,43875 * R_{az} - 10,05 * G + 10,3583 * V_{II} - 0,124583 * I * V_{II}$
$F_H = -52,8929 + 0,23857 * I + 3,15714 * V_H + 25,6234 * V_{II} - 0,01393 * I * V_H - 1,46753 * V_H * V_{II}$	$F_H = -13,2917 + 0,075 * I + 22,4167 * V_{II}$
$V_{vc} = 27,6728 - 0,10219 * I + 0,42589 * V_H - 7,44886 * V_{II} + 0,03949 * I * V_{II}$	$V_{vc} = 28,8058 - 0,0871875 * I - 0,2444417 * R_{az} - 7,25833 * V_{II} + 0,034375 * I * V_{II} + 0,124167 * R_{az} * V_{II}$

$N = -1401,92857 + 5,61786 * I + 369,82$ $* V_H + 1564,68 * V_{II} - 1,29 * I$ $* V_H - 6,52 * I * V_{II} - 235,32$ $* V_H * V_{II} + 0,98 * I * V_H * V_{II}$	$N = 1767,38 - 6,32 * I + 0,94333 * R_{az}$ $- 502,333 * V_{II} + 2,225 * I$ $* V_{II} + 5,36667 * R_{az} * V_{II}$
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Можно достигнуть наилучшего значения для каждого параметра оптимизации отдельно, но невозможно это сделать для девяти функций одновременно, так как коэффициенты перед факторами в каждой модели различны. Поэтому имеет место только компромиссное решение задачи оптимизации режимов плазменно-порошковой наплавки. Все параметры, кроме высоты наплавленного слоя, преобразуем в неравенства, знак которых показывает направление оптимизации, а правая часть – требуемый уровень. Высоте наплавленного слоя присваивается конкретное значение. Основным параметром оптимизации целесообразно назначить площадь наплавленного металла ( $F_H \rightarrow \max$ ), а остальные использовать в качестве ограничений. Отсюда получено следующее условие, записанное в виде системы неравенств, для того чтобы в дальнейшем можно было перейти к решению задачи линейного программирования:

для случая наплавки ниточными валиками

$$F_H = -52,8929 + 0,23857 * I + 3,15714 * V_H + 25,6234 * V_{II} - 0,01393 * I * V_H - 1,46753 * V_H * V_{II} \rightarrow \max$$

при ограничениях:

$$d = 1,81696 - 0,05429 * V_H + 0,10682 * V_{II} \leq 1,6$$

$$V_{Cr7C3} = 61,2446 - 0,25813 * I + 0,93214 * V_H + 10,4773 * V_{II} \geq 20$$

$$f = 0,57568 - 0,000490625 * I + 0,02368 * V_H + 0,12851 * V_{II} - 0,00854 * V_H * V_{II} \geq 0,75$$

$$H = 2,08643 - 0,00631 * I + 0,00893 * V_H + 2,38929 * V_{II} - 0,10844 * V_H * V_{II} = \text{const}$$

$$B = 2,02500 + 0,06188 * I - 0,725 * V_H \geq 8$$

$$Y_o = 23,8036 + 0,182813 * I - 3,77143 * V_H - 25,5519 * V_{II} + 1,42532 * V_H \\ * V_{II} \leq 15$$

$$V_{vc} = 27,6728 - 0,10219 * I + 0,42589 * V_H - 7,44886 * V_{II} + 0,03949 * I * V_{II} \\ \geq 9$$

$$N = -1401,92857 + 5,61786 * I + 369,82 * V_H + 1564,68 * V_{II} - 1,29 * I * V_H \\ - 6,52 * I * V_{II} - 235,32 * V_H * V_{II} + 0,98 * I * V_H * V_{II} \geq 350$$

для широкослойной наплавки

$$F_H = -13,2917 + 0,075 * I + 22,4167 * V_{II} \rightarrow \mathit{max}$$

при ограничениях:

$$d = -0,865667 + 0,00405 * I - 0,0337 * R_{az} + 0,238333 * V_{II} - 0,0015 * I \\ * V_{II} + 0,011 * R_{az} * V_{II} \leq 1,6$$

$$V_{Cr7C3} = 56,4517 - 0,18375 * I - 0,9530 * R_{az} + 8,533 * V_{II} + 0,49 * R_{az} * V_{II} \\ \geq 20$$

$$f = 0,836125 - 0,00053125 * I + 0,0043 * R_{az} - 0,035 * G + 0,035 * V_{II} \\ - 0,0015 * R_{az} * V_{II} \geq 0,75$$

$$H = -1,29 + 0,00756 * I + 0,0051 * R_{az} + 4,225 * V_{II} - 0,00813 * I * V_{II} - 0,06 \\ * R_{az} * V_{II} = 3$$

$$B = -5,06875 + 0,06484 * I + 0,67688 * R_{az} \geq 8$$

$$Y_o = -53,7633 + 0,419708 * I + 0,43875 * R_{az} - 10,05 * G + 10,3583 * V_{II} \\ - 0,124583 * I * V_{II} \leq 15$$

$$V_{vc} = 28,8058 - 0,0871875 * I - 0,2444417 * R_{az} - 7,25833 * V_{II} + 0,034375 \\ * I * V_{II} + 0,124167 * R_{az} * V_{II} \geq 9$$

В качестве инструмента для решения задачи выбора оптимальных параметров процесса плазменно-порошковой наплавки использована процедура «Поиск решения» пакета MS Excel.

### 3.3. Расчётное определение параметров наплавки с помощью процедуры «Поиск решения» пакета MS Excel.

В качестве инструмента для решения задачи выбора оптимальных параметров процесса плазменно-порошковой наплавки целесообразно использовать пакет MS Excel. Для решения задачи оптимизации используется процедура «Поиск решения» пакета MS Excel. В процедуре «Поиск решения» используется код нелинейной оптимизации Generalized Reduced Gradient, что позволяет решать оптимизационные задачи, представленные как линейными, так и нелинейными математическими моделями. Эта надстройка представляет собой универсальный, снабжённый многими приложениями инструмент для решения задач. Диалоговое окно этой процедуры содержит следующие рабочие поля:

Параметры поиска решения

Оптимизировать целевую функцию:

До:  Максимум  Минимум  Значения:

Изменяя ячейки переменных:

В соответствии с ограничениями:

- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 

Сделать переменные без ограничений неотрицательными

Выберите метод решения:

Метод решения

Для гладких нелинейных задач используйте поиск решения нелинейных задач методом ОПГ, для линейных задач - поиск решения линейных задач симплекс-методом, а для негладких задач - эволюционный поиск решения.

Рисунок 4 – Пример заполнения диалогового окна *Поиск решения*

- В соответствии с ограничениями – служит для отображения списка граничных условий поставленной задачи:

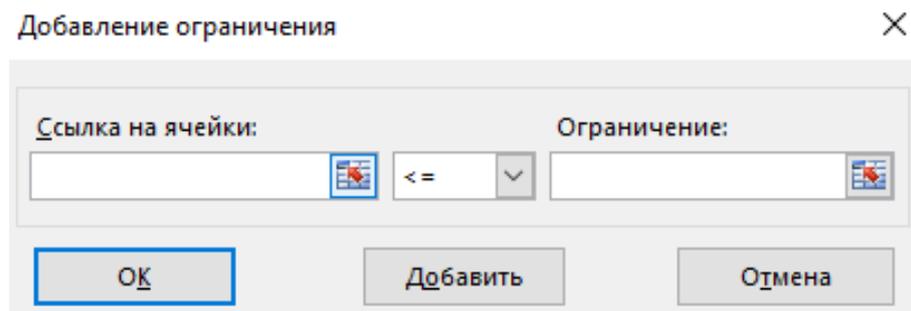


Рисунок 5 – Пример заполнения диалогового окна Добавление ограничения

Результат ввода исходных данных в рабочую таблицу MS Excel представлен на рис. 6 и рис. 7:

I	260		
Vн	9,46015		
Vп	1,81138		
Площадь наплавленного металла, мм2 (I, Vн, Vп)	26,0058		
Ограничения			
Ширина, мм	11,2552	>=	8
Высота, мм	3	=	3
Доля основного металла в наплавленном, %	13,7967	<=	15
Ток, А (I)	260	>=	220
Ток, А (I)	260	<=	260
Скорость наплавки, м/ч (Vн)	9,46015	>=	6
Скорость наплавки, м/ч (Vн)	9,46015	<=	13
Скорость подачи порошка, кг/ч (Vп)	1,81138	>=	1,1
Скорость подачи порошка, кг/ч (Vп)	1,81138	<=	2,2
Фактор формы частиц VC	0,75857	>=	0,75
Объёмная доля частиц VC, %	10,2378	>=	9
Объёмная доля эвтектики карбида Cr7C3, %	21,9274	>=	20
Диаметр частиц VC, мкм	1,49686	<=	1,6
Число частиц VC, штук	472,794	>=	350
Площадь наплавленного металла, мм2	26,0058	>=	10

Рисунок 6 – Результат ввода данных (наплавка ниточными валиками)

В ячейках D7-D22 введены ограничения, в ячейке B4 – значение целевой функции  $F_n$  (площадь наплавленного металла), математическая модель параметра оптимизации. В ячейки B4, B7-B9 и B16-B22 записаны полученные уравнения регрессии. После проведения процедуры оптимизации ячейки B4,

значение которой должно стремиться к максимуму, в соответствии с заданными ограничениями, получаем оптимальное сочетание значений всех параметров процесса, которые записываются в ячейки B1-B4, B7-B22.

I	248,919		
Raz	13,3765		
G	0,5		
Vп	1,73447		
Площадь наплавленного металла, мм2 (I, Raz, G, Vп)	84,0274		
Ограничения			
Ширина, мм	20,1254	>=	8
Высота, мм	3	=	3
Доля основного металла в наплавленном, %	16,1011	<=	15
Ток, А (I)	248,919	>=	220
Ток, А (I)	248,919	<=	260
Размах колебаний, мм (Raz)	13,3765	>=	10
Размах колебаний, мм (Raz)	13,3765	<=	20
Частота, Гц (G)	0,5	>=	0,25
Частота, Гц (G)	0,5	<=	0,5
Скорость подачи порошка, кг/ч (Vп)	1,73447	>=	0,7
Скорость подачи порошка, кг/ч (Vп)	1,73447	<=	2,2
Фактор формы частиц VC	0,76981	>=	0,75
Объемная доля частиц VC, %	8,91518	>=	9
Объемная доля эвтектики карбида Cr7C3, %	24,2764	>=	20
Диаметр частиц VC, мкм	1,47149	<=	1,6
Число частиц VC, штук	429,926	>=	350
Площадь наплавленного металла, мм2	84,0274	>=	10

Рисунок 7 – Результат ввода данных (широкослойная наплавка)

В ячейках D7-D24 введены ограничения, в ячейке B5 – значение целевой функции  $F_n$  (площадь наплавленного металла), математическая модель параметра оптимизации. В ячейки B5, B7-B9 и B18-B24 записаны полученные уравнения регрессии. После проведения процедуры оптимизации ячейки B5, значение которой должно стремиться к максимуму, в соответствии с заданными ограничениями, получаем оптимальное сочетание значений всех параметров процесса, которые записываются в ячейки B1-B5, B7-B24.

### 3.4. Программное обеспечение

В качестве программного обеспечения, на основе полученных уравнений регрессии, был разработан программный продукт, позволяющий рассчитать и выбрать оптимальные параметры процесса плазменно-порошковой наплавки. Данная разработка реализована в операционной системе Windows 10 в интегрированной среде разработки программного обеспечения, разработанной корпорацией Microsoft, Visual Basic.

Visual Basic сочетает в себе процедуры и элементы объектно-ориентированных и компонентно-ориентированных языков программирования. Интегрированная среда разработки VB включает инструменты для визуального проектирования пользовательского интерфейса, редактор кода и инструменты для отладки приложений.

Visual Basic также является хорошим средством быстрой разработки (RAD – это концепция создания средств разработки программных продуктов, уделяющая особое внимание скорости и удобству программирования, созданию технологического процесса, позволяющего программисту максимально быстро создавать компьютерные программы.) приложений баз данных для операционных систем семейства Microsoft Windows. В среде присутствует множество компонентов, которые помогут программисту сразу же начать разрабатывать логику приложения, не отвлекая его внимание на написание кода запуска программы, подписки на события и других механизмов, которые VB реализует автоматически.

Диалоговое окно этой программы выглядит следующим образом:

<b>Расчет:</b>		<b>Макро:</b>		<b>Микро:</b>	
Сила тока (I), А	<input type="text"/>	Ширина валика (B), мм		Фактор формы частиц VC (f)	
Скорость наплавки (Vн), м/ч	<input type="text"/>	Высота валика (H), мм		Объемная доля частиц VC (Vvc), %	
Скорость подачи порошка (Vп), кг/ч	<input type="text"/>	Площадь наплавленного металла (Fn), мм <sup>2</sup>		Диаметр частиц VC (d), мкм	
				Число частиц VC (N), штук	
<input type="checkbox"/> С колебаниями		Доля основного металла в наплавленном (Yo), %		Объемная доля эвтектики карбида Cr7C3 (VCr7C3), %	
Размах колебаний (Raz), (мм)	<input type="text"/>	Результат: <input type="text"/>		<input type="button" value="Сбросить"/>	
Частота колебаний (G), (Гц)	<input type="text"/>				
<b>Оптимизация:</b>		<b>Макро:</b>		<b>Микро:</b>	
Высота валика (H), мм	<input type="text"/>	Ширина валика (B), мм	<input type="text"/>	Фактор формы частиц VC (f)	<input type="text"/>
<b>Параметры режима:</b>		Высота валика (H), мм	<input type="text"/>	Объемная доля частиц VC (Vvc), %	<input type="text"/>
Сила тока (I), А	<input type="text"/>	Площадь наплавленного металла (Fn), мм <sup>2</sup>	<input type="text"/>	Диаметр частиц VC (d), мкм	<input type="text"/>
Скорость наплавки (Vн), м/ч	<input type="text"/>	Доля основного металла в наплавленном (Yo), %	<input type="text"/>	Число частиц VC (N), штук	<input type="text"/>
Скорость подачи порошка (Vп), кг/ч	<input type="text"/>			Объемная доля эвтектики карбида Cr7C3, %	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> С колебаниями		<input type="button" value="Рассчитать оптимальные параметры режима и показатели макро- и микростроения для заданной высоты"/>		<input type="button" value="Сбросить"/>	
Размах колебаний (Raz), (мм)	<input type="text"/>				
Частота колебаний (G), (Гц)	<input type="text"/>				

Рисунок 8 – Программа для расчёта и выбора оптимальных параметров плазменно-порошковой наплавки

Чтобы более наглядно понять алгоритм работы программы были составлены блок-схемы для части расчёта и оптимизации:

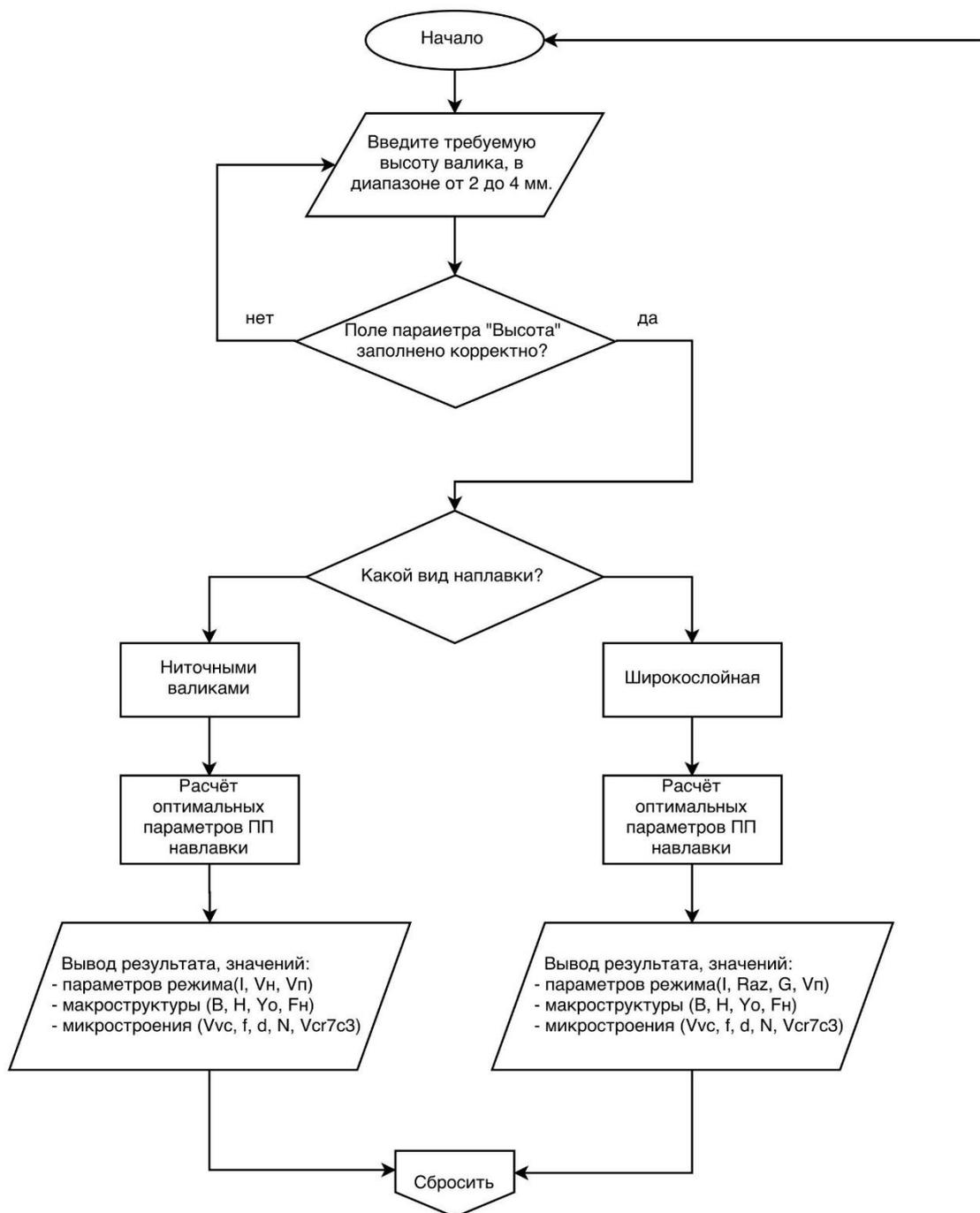


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма программы для подбора оптимальных значений параметров плазменно-порошковой наплавки.

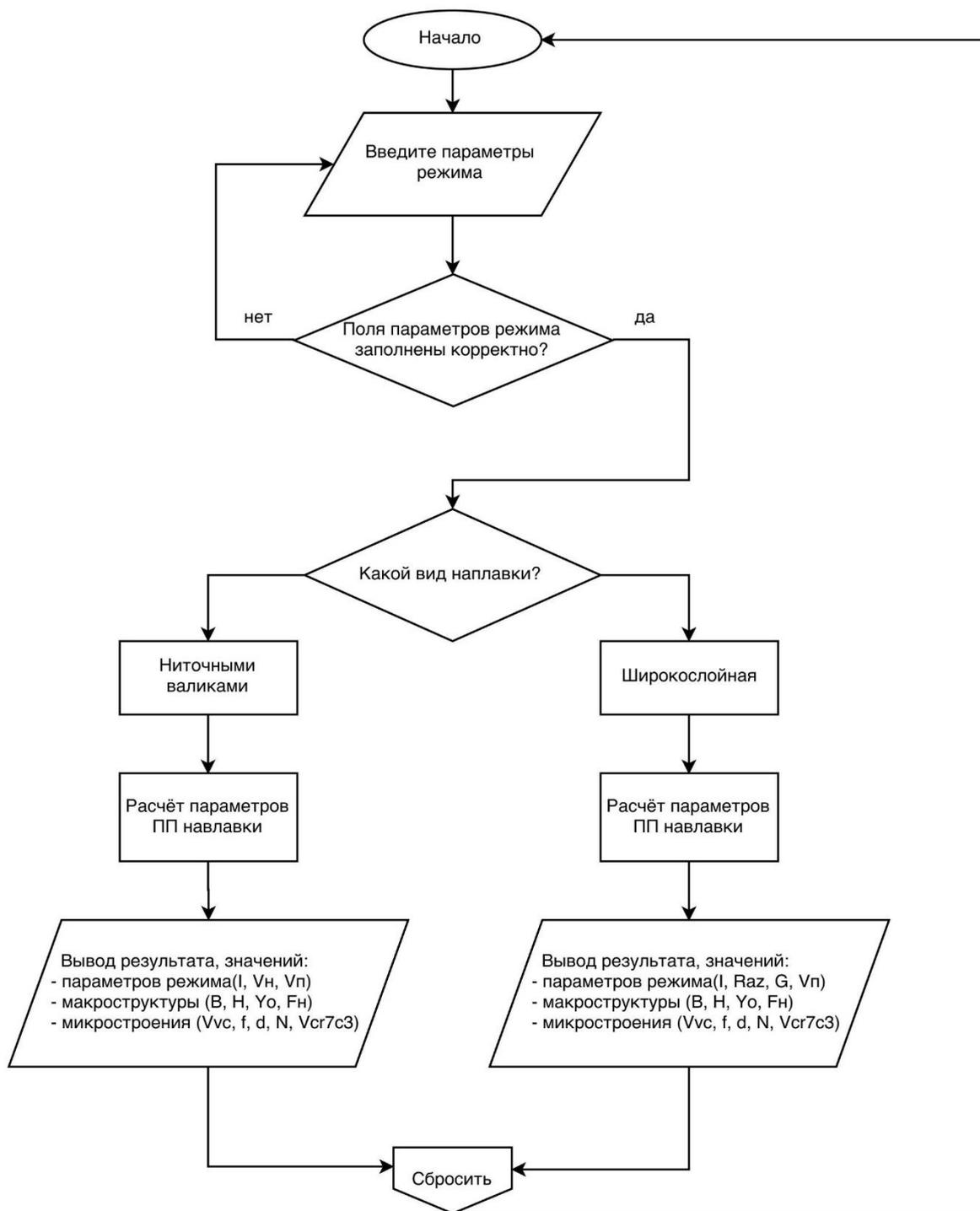


Рисунок 10 – Блок схема алгоритма программы для расчёта параметров плазменно-порошковой наплавки.

#### 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Fast - анализ

В качестве объекта исследования был выбран микротвердомер HVS-1000.

##### 4.1. Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом

При выполнении магистерской диссертации основная часть времени проводилась в лаборатории 16А корпуса. В этой аудитории проводилось определение макро- и микроструктуры на сварных образцах.

Таблица 14 – Классификация функций, выполняемых объектом.

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
1.Координатный стол	1	Обеспечивает перемещение по заданной траектории		x	
2.Рукоятка столика	1	Обеспечивает перемещение координатного столика			x
3.Пластина столика	1	Обеспечивает установку координатного столика			x
4.Пассатижи	1	Обеспечивают зажим координатного столика			x
5.Сменный увеличенный V образный стол	1	Обеспечивает перемещение образца по заданной траектории		x	
6. Сменный уменьшенный V образный стол	1	Обеспечивает перемещение образца по заданной траектории		x	
7.Конический алмазный индентор – алмазная пирамида	1	Необходим для проставления уколов	x		

8.Стандартный блок для испытаний на твёрдость по Виккерсу	2	Обеспечивают определение твёрдости по методу Виккерса	x		
9. Принтер	1	Необходим для распечатки результатов исследования			x

На основании данных из таблицы 1 можно сказать, что исследуемый объект состоит из 9 элементов. Главной задачей объекта является определение микротвёрдости сварных образцов. Для этого машина использует 3 основных элемента. Остальные элементы являются вспомогательными либо главными.

#### 4.2. Определение значимости выполняемых функций объектом

Для оценки значимости элементов необходимо прибегнуть к методу расстановки приоритетов, предложенному Блумбергом В.А. и Глуценко В.Ф. В основу данного метода положено расчетно-экспертное определение значимости каждого элемента. Для этого нужно построить матрицу смежности элементов.

Таблица 15 – Матрица смежности

	Координатный стол	Рукоятка столика	Пластина столика	Пассатижи	Сменный увеличенный V-образный стол	Сменный уменьшенный V-образный стол	Конический алмазный индентор	Стандартный блок для испытаний на твёрдость	Принтер
Координатный стол	=	>	>	>	=	=	<	<	>
Рукоятка столика	<	=	>	>	<	<	>	<	=
Пластина столика	<	<	=	<	<	<	<	<	>
Пассатижи	<	<	>	=	<	<	>	<	=
Сменный увеличенный V-образный стол	>	>	>	>	=	<	>	<	>
Сменный уменьшенный V-образный стол	>	>	>	>	>	=	>	<	>
Конический алмазный индентор-алмазная пирамида	<	<	>	<	<	<	=	=	>
Стандартный блок для	=	>	>	>	>	>	>	=	>

испытаний на твёрдость по микро-Виккерсу										
Принтер	<	<	<	=	<	<	<	<	<	=

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

Для наглядности необходимо произвести преобразование матрицы смежности в матрицу количественных соотношений функций.

Таблица 16 – Матрица количественных соотношений функций

	Координатный стол	Рукоятка столика	Пластина столика	Пассатижи	Сменный увеличенный стол	Уменьшенный стол	Инденго	Стандартный блок по Виккерсу	Принтер	Итого	Проверка
Координатный стол	1	1,5	1,5	1,5	1	1	0,5	0,5	1,5	10	0,12
Рукоятка столика	0,5	1	1,5	1,5	0,5	0,5	1,5	0,5	1	8,5	0,11
Пластина столика	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	6	0,07
Пассатижи	0,5	0,5	1,5	1	0,5	0,5	1,5	0,5	1	7,5	0,09
Сменный увеличенный V-образный стол	1,5	1,5	1,5	1,5	1	0,5	1,5	0,5	1,5	11	0,14
Сменный уменьшенный V-образный стол	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1,5	0,5	1,5	12	0,15
Конический алмазный инденгор-алмазная пирамида	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1,5	7,5	0,09
Стандартный блок для испытаний на твёрдость по микро-Виккерсу	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1,5	12,5	0,16
Принтер	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	5,5	0,07
									<b>Σ=</b>	<b>80,5</b>	<b>1</b>

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

В рамках третьего этапа происходит определение значимости элементов путем деления балла, полученного по каждой функции, на общую сумму баллов по всем функциям.

### **4.3. Расчёт значимости функций**

Определяем значимость элемента путем деления балла, полученного по каждому элементу, на общую сумму баллов по всем элементам:

Координатный стол -  $10/80,5=0,12$ ;

Рукоятка столика -  $8,5/80,5=0,11$ ;

Пластина столика -  $6/80,5=0,07$ ;

Пассатижи –  $7,5/80,5=0,09$ ;

Сменный увеличенный V образный стол -  $11/80,5=0,14$ ;

Сменный уменьшенный V образный стол -  $12/80,5=0,15$ ;

Конический алмазный индентор – алмазная пирамида –  $7,5/80,5=0,09$ ;

Стандартный блок для испытаний на твёрдость по Виккерсу –  $12,5/80,5=0,16$ ;

Принтер –  $5,5/80,5=0,07$ .

### **4.4. Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования**

Задача данной стадии заключается в оценке уровня затрат на каждый элемент. Сделать это возможно с помощью применения нормативного метода.

Таблица 17 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом

исследования.

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Норма расхода, кг	Трудоемкость детали, нормо-час	Стоимость материала, руб.	Заработная плата, руб.	Себестоимость, руб.	Итого	
Координатный стол	1	Обеспечивает перемещение по заданной траектории	0,23	0,3	40,6	28,3	44,1	113,53	0,07
Рукоятка столика	1	Обеспечивает перемещение координатного столика	0,32	0,45	50,8	22,7	76,8	175	0,11
Пластина столика	1	Обеспечивает установку координатного столика	1	0,76	54,2	44,1	59,7	158	0,049
Пассажик	1	Обеспечивают зажим координатного столика	0,81	0,34	68,1	25,7	72,3	167,25	0,11
Сменный увеличенный V-образный стол	1	Обеспечивает перемещение образца по заданной траектории	0,30	0,4	45,3	31,2	49,1	126,3	0,08
Сменный уменьшенный V-образный стол	1	Обеспечивает перемещение образца по заданной траектории	0,27	0,3	43,1	28,2	46,1	117,97	0,07

Конический алмазный индентор -алмазная пирамида	1	Необходим для Проставления уколов	2	1,75	80,2	80,1	88	252,05	0,16
Стандартный блок для испытаний на твердость по Виккерсу	2	Обеспечивают определение твердости по методу Виккерса	2	1,83	85,1	86,3	90	265,23	0,17
Принтер	1	Необходим для распечатки результатов исследования	0,82	0,87	70,5	27,7	76,8	175	0,55

Данная информация необходима для построения функционально-стоимостной диаграммы.

#### 4.5. 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) (рисунок 10).

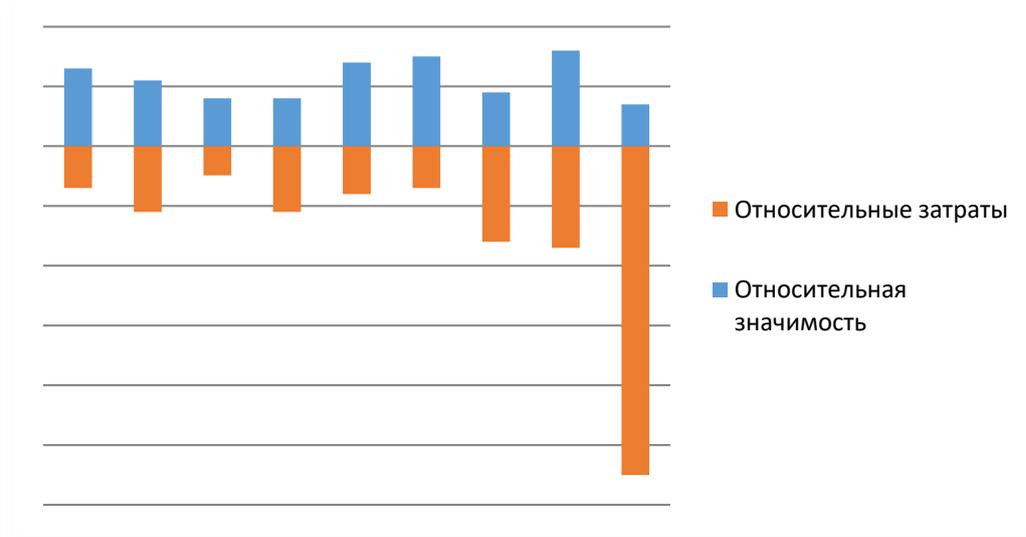


Рисунок 11 – Функционально-стоимостная диаграмма

Анализ, приведенный выше ФСД показывает наличие рассогласования по позиции 3. Необходимо провести работы по ликвидации данных диспропорций.

#### 4.6. Оптимизация функций, выполняемых объектом

В качестве оптимизации данных функций можно выделить следующее:

- применение аналогичного принтера другого производителя;
- исключение затрат на транспортировку.

При использовании принтера, который может выполнять все те же требуемые функции, другого производителя (отечественного или более дешёвого), но по стоимости будет на много дешевле, прогнозируемая функционально – стоимостная диаграмма будет выглядеть следующим образом:

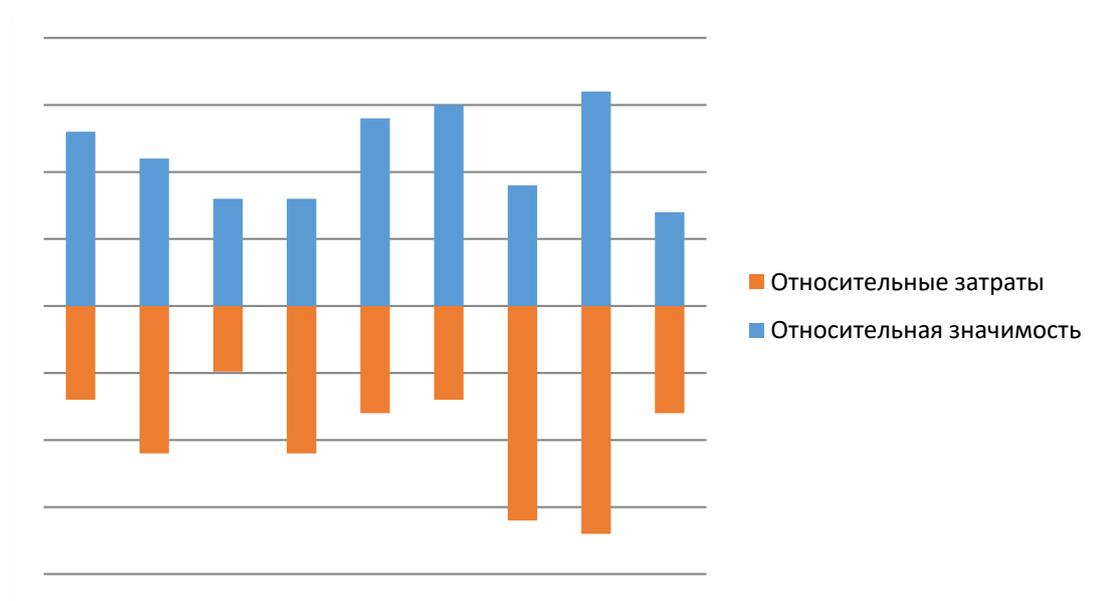


Рисунок 12 – Прогнозируемая функционально-стоимостная диаграмма

Анализ, предполагаемой ФСД показывает, что предложенный метод оптимизации способен устранить диспропорцию по данной позиции.

В процессе проделанной работы было установлено, что затраты на принтер оказались не пропорциональны его функциональной значимости. Для предотвращения повышенных затрат было предложено использовать принтер отечественного производителя либо принтер с более низкой ценой.

## **5. Социальная ответственность**

Одна из основных задач социальной ответственности заключается в обеспечении безопасности труда человека, то есть создание таких условий труда, при которых исключается воздействие на работающих опасных вредных производственных факторов.

Вопросы, связанные с условиями труда, характеризуются не только трудовыми процессами, но и окружающей санитарно - гигиенической обстановкой. Если при трудовом процессе нагрузка падает на мышечную и нервную систему человека, то окружающая обстановка (температура воздуха, его влажность, загрязнение) вызывают изменения в функционировании дыхания, зрения, слуха, кровообращения, т.к. каждый из этих факторов отрицательно влияет на трудовую деятельность человека, утомляет, ослабляет внимание, что ведет к наибольшей вероятности травмы.

При разработке мер защиты от выявленных вредных производственных факторов необходимо дать описание применяемым мерам защиты с учетом требований нормативных документов.

Соблюдение правил и норм по безопасности жизнедеятельности позволяет улучшить и облегчить условия труда, обеспечить широкие возможности для высокопроизводительной работы.

Именно поэтому необходимо провести анализ рабочего пространства, а также рабочего оборудования. Выявить проблемы и предложить способы их устранения. При выполнении дипломной бакалаврской основная часть времени проводилась в лаборатории 16А корпуса. Так как, данная лаборатория находится внутри здания, на проектировщика возможны действия следующих вредных и опасных факторов: отклонение показателей микроклимата, недостаточная освещенность, превышение уровня шума, ультрафиолетовое излучение, электрический ток, пожар. Воздействие вредных производственных факторов на работающих может привести к заболеванию и снижению производительности труда.

## **5.1. Техногенная безопасность**

Техногенная безопасность – состояние защищённости населения, производственного персонала, объектов экономики и окружающей среды от опасных техногенных происшествий.

Для того чтобы качество и производительность труда были на уровне нужно организовать рабочее место так, чтобы оно соответствовало установленным нормам и ГОСТ 22269-76. Настоящий стандарт распространяется на индивидуальные рабочие места операторов стационарных и подвижных объектов системы "человек-машина" и устанавливает общие эргономические требования к взаимному расположению элементов рабочего места: пульта управления, средств отображения информации, органов управления, кресла, вспомогательного оборудования.

### **Общие требования**

При взаимном расположении элементов рабочего места необходимо учитывать: рабочую позу человека-оператора; пространство для размещения человека-оператора; возможность обзора элементов рабочего места; возможность обзора пространства за пределами рабочего места; возможность ведения записей, размещения документации и материалов, используемых человеком-оператором.

Взаимное расположение элементов рабочего места должно обеспечивать возможность осуществления всех необходимых движений и перемещений для эксплуатации и технического обслуживания оборудования. При этом должны учитываться ограничения, налагаемые спецодеждой и снаряжением человека-оператора.

Взаимное расположение элементов рабочего места должно обеспечивать необходимые зрительные и звуковые связи между оператором и оборудованием, а также между операторами.

При расположении элементов рабочего места должны быть предусмотрены необходимые средства защиты человека-оператора от

воздействия опасных и вредных факторов, предусмотренных ГОСТ 12.0.003-74, а также условия для экстренного ухода человека-оператора с рабочего места.

Взаимное расположение элементов рабочего места должно способствовать оптимальному режиму труда и отдыха, снижению утомления оператора, предупреждению появления ошибочных действий.

Взаимное расположение пульта управления, кресла, органов управления и средств отображения информации должно производиться в соответствии с антропометрическими показателями, структурой деятельности, психофизиологическими и биомеханическими характеристиками человека-оператора.

Опасные и вредные производственные факторы подразделяются по природе действия на следующие группы:

- физические;
- химические;
- биологические;
- психофизиологические.

Физические:

- повышенный уровень шума на рабочем месте;
- повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне;
- отсутствие или недостаток естественного света;
- недостаточная освещенность рабочей зоны;
- повышенный уровень статического электричества.

Биологические:

- патогенные микроорганизмы (бактерии, вирусы, риккетсии, спирохеты, грибы, простейшие) и продукты их жизнедеятельности;
- микроорганизмы (растения и животные).

Психофизиологические:

- физические перегрузки;
- нервно-психические перегрузки.

Рассмотрим характерные для лаборатории опасные и вредные производственные факторы.

Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны.

Одним из необходимых условий нормальной жизнедеятельности человека является обеспечение в помещениях нормальных метеорологических условий, оказывающих существенное влияние на тепловое самочувствие человека.

Метеорологические условия в производственных помещениях, или их микроклимат, зависят от теплофизических особенностей технологического процесса, климата, сезона года, условий вентиляции и отопления.

Под микроклиматом производственных помещений понимается климат окружающей человека внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также температуры окружающих его поверхностей.

Перечисленные параметры – каждый в отдельности и в совокупности – оказывают влияние на работоспособность человека, его здоровье.

Человек постоянно находится в процессе теплового взаимодействия с окружающей средой. Для нормального течения физиологических процессов в организме человека необходимо, чтобы выделяемое организмом тепло отводилось в окружающую среду. Когда это условие соблюдается, наступают условия комфорта и у человека не ощущается беспокоящих его тепловых ощущений - холода или перегрева.

Теплообмен между человеком и окружающей средой осуществляется: конвекцией в результате омывания тела воздухом, теплопроводностью, излучением на окружающие предметы и в процессе тепломассообмена при испарении влаги, выводимой на поверхность кожи потовыми железами и при дыхании.

Количество теплоты, выделяемой человеком с выдыхаемым воздухом, зависит от его физической нагрузки, влажности, и температуры вдыхаемого воздуха.

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 энергозатрат 121 - 150 ккал/ч (140 - 174 Вт), производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением.

Таблица 18 – 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		
	Оптимальная	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

Микроклимат комнаты поддерживается на допустимом уровне системой водяного центрального отопления, естественной вентиляцией, а также искусственным кондиционированием и дополнительным прогревом в холодное время года.

Шум на рабочем месте.

Среди основных чувств человека слух и зрение играют важнейшую роль – позволяют человеку владеть звуковыми и зрительными информационными полями.

Даже беглый анализ системы человек – машина – окружающая среда дает основание считать одной из приоритетнейших проблем взаимодействия человека с окружающей средой, особенно на локальном уровне (цех, участок), проблему шумового загрязнения среды.

Длительное воздействие шума может привести к ухудшению слуха, а в отдельных случаях – к глухоте. Шумовое загрязнение среды на рабочем месте неблагоприятно воздействует на работающих: снижается внимание, увеличивается расход энергии при одинаковой физической нагрузке, замедляется скорость психических реакций и т.п. В результате снижается производительность труда и качество выполняемой работы.

Понятие "шум" весьма субъективно. Всякий нежелательный в данный момент звук (или звуки) человек воспринимает как шум. Одни и те же звуки разными людьми могут восприниматься по-разному.

Физиологи и гигиенисты определяют шум как звук, оцениваемый негативно и наносящий вред здоровью.

Машины и механизмы, используемые на производстве, являются источниками звуков различной частоты и интенсивности, изменяющихся во времени. Поэтому производственный шум рассматривают как совокупность звуков различной интенсивности и частоты, беспорядочно изменяющихся во времени и вызывающих у работающих неприятные субъективные ощущения.

По природе возникновения шумы машин или агрегатов делятся на:

- механические;
- аэродинамические и гидродинамические;
- электромагнитные.

При работе различных механизмов, агрегатов, оборудования одновременно могут возникать шумы различной природы.

Любой источник шума характеризуется, прежде всего, звуковой мощностью.

Методы установления предельно допустимых шумовых характеристик стационарных машин изложены в ГОСТ 12.1.023–80. Для оценки шума используют частотный спектр измеряемого уровня звукового давления, выраженного в децибелах (дБ), в активных полосах частот, который сравнивают с предельным спектром (таблица 19).

Таблица 19 – 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

В лаборатории уровень шума составляет 48 дБА.

Освещенность рабочей зоны.

Большое количество информации, получаемой человеком из внешнего мира, поступает через зрительный канал.

Качество получаемой информации, получаемой посредством зрения, во многом зависит от освещения.

Неудовлетворительное освещение может исказить информацию; кроме того, оно утомляет не только зрение, но вызывает утомление организма в целом. Неправильное освещение может также являться причиной травматизма: плохо освещенные опасные зоны, слепящие лампы и блики от них, резкие тени ухудшают или вызывают полную потерю ориентации работающих.

Кроме того, при неудовлетворительном освещении снижается производительность труда и увеличивается брак в работе.

Согласно санитарно-гигиеническим требованиям рабочее место инженера 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.

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 СП 52.13330.2011 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 СП 52.13330.2011 при третьем разряде зрительной работы (Шг: контраст малый и средний, фон светлый и средний), при естественном боковом освещении  $КЕО_{ен} = 1,2 \%$ , 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 СП 52.13330.2011.

## **5.2. Электробезопасность**

Современное производство характеризуется широким применением различных электроустановок. В этой связи большое значение в общей системе инженерно-экологических мероприятий приобретают вопросы обеспечения электробезопасности. В данном разделе будут рассмотрены вопросы

обеспечения электробезопасности промышленных электроустановок напряжением до 1кВ.

Согласно ГОСТ 12.1.009-76 электробезопасность – система организационных мероприятий и технических средств, предотвращающих вредное и опасное воздействие на работающих электрического тока и электрической дуги.

Используя электротехнические изделия на производстве или в быту, человек может попасть под действие электрического тока.

При этом тяжесть поражения электрическим током будет зависеть от множества факторов, в том числе: значения протекающего через человека тока, значения и рода напряжения, времени воздействия электрического тока на организм человека, мест контакта элементов электрической цепи с телом человека, индивидуальных особенностей человека, окружающей среды и окружающей человека обстановки; типа электроустановки; особенностей эксплуатации электроустановки и др.

Основными причинами поражения электрическим током при работе с компьютером и микротвердомером могут послужить следующие факторы: прикосновение к токоведущим частям или прикосновение к конструктивным частям, оказавшимся под напряжением. С целью избегания опасности поражения электрическим током необходимо соблюдать следующие правила электрической безопасности:

- перед включением компьютера и микротвердомера в сеть должна быть визуально проверена ее электропроводка на отсутствие возможных видимых нарушений изоляции, а также на отсутствие замыкания токопроводящих частей на корпус компьютера;
- при появлении признаков замыкания необходимо немедленно отключить от электрической сети компьютера и микротвердомера;
- запрещается при включенном компьютере и микротвердомере одновременно прикасаться к приборам, имеющим естественное заземление.

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

Среди распространенных способов защиты от поражения электрическим током при работе с электроустановками различают:

- защитное заземление – предназначено для превращения «замыкания на корпус» в «замыкание на землю», с тем, чтобы уменьшить напряжение прикосновения и напряжение шага до безопасных величин (выравнивание самый распространенный способ защиты от поражения электрическим током;
- зануление – замыкание на корпус электроустановок;
- системы защитного отключения – отключение электроустановок в случае проявления опасности пробоя на корпус;
- защитное разделение сетей;
- предохранительные устройства.

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.

К работам с компьютером и микротвердомером допускаются лица:

- прошедшие медицинское обследование;
- 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;

- ознакомлен 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.

### **5.3. Экологическая безопасность**

Охрана окружающей среды - комплекс мер, предназначенных для ограничения отрицательного влияния человеческой деятельности на природу. Такими мерами могут являться:

- ограничение выбросов в атмосферу и гидросферу с целью улучшения общей экологической обстановки;
- создание заповедников, национальных парков с целью сохранения природных комплексов;
- ограничение ловли рыбы, охоты с целью сохранения определённых видов;
- ограничение выброса мусора.

Многие предприятия сейчас внедряют новейшие технологии в процесс эксплуатации, отчистки и утилизации отходов производства. Например, инженер, использует электронные пакеты обработки и носители информации, что значительно сокращает применение бумаги, а значит и вырубку тысячи гектаров леса.

Применение персонального компьютера 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 существенных воздействий на окружающую среду не возникало. В ходе работы были следующие отходы: использованная бумага и вата, которые в ходе их непригодности выкидывались в мусорное ведро, а затем и в мусорный контейнер.

#### **5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Состояние защищенности населения, объектов народного хозяйства и окружающей природной среды от опасностей в ЧС. Различают безопасность по видам (промышленная, радиационная, химическая, сейсмическая, пожарная, биологическая, экологическая), по объектам (население, объект народного хозяйства и окружающая природная среда) и основным источникам ЧС.

Чрезвычайные ситуации относятся к совокупности опасных событий или явлений, приводящих к нарушению безопасности жизнедеятельности. К ним относятся: высокие и низкие температуры, физическая нагрузка, поражающие токсичные дозы сильнодействующих ядовитых веществ, высокие дозы облучения, производственные шумы и вибрации и многое другое могут приводить к нарушению жизнедеятельности человека.

Источник чрезвычайной ситуации — опасное природное явление, авария или опасное техногенное происшествие, широко распространенная инфекционная болезнь людей, сельскохозяйственных животных и растений, а также применение современных средств поражения, в результате чего произошла или может возникнуть чрезвычайная ситуация.

Поражающий фактор источника чрезвычайной ситуации — составляющая опасного явления или процесса, вызванная источником чрезвычайной ситуации и характеризуемая физическими, химическими и биологическими действиями или проявлениями, которые определяются или выражаются соответствующими параметрами. Поражающие воздействия, оказываемые при чрезвычайных ситуациях, могут иметь различный характер: механический, тепловой, химический, радиационный, биологический.

Единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций решает вопросы по защите населения и территорий от

чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и иного характера с помощью комплекса мероприятий, обеспечивающий в мирное время защиту населения, территорий и окружающей среды, материальных и культурных ценностей государства. Объединяет в себя органы управления, силы и средства федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, организаций, в полномочия которых входит решение вопросов по защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций.

Основные задачи РСЧС:

- разработка правовых и экономических норм, связанных с защитой населения;
- подготовка населения к действиям при чрезвычайных ситуациях;
- прогнозирование чрезвычайных ситуаций;
- оценка и ликвидация социально-экономических последствий ЧС;
- надзор и контроль в сфере защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций;
- международное сотрудничество в области защиты населения и территорий;
- ликвидация ЧС.

Защита населения от чрезвычайных ситуаций — это совокупность взаимоувязанных по времени, ресурсам и месту проведения мероприятий РСЧС, направленных на предотвращение или предельное снижение потерь населения и угрозы его жизни и здоровью от поражающих факторов и воздействий источников чрезвычайных ситуаций.

Комплекс мероприятий по защите населения включает:

- оповещение населения об опасности, его информирование о порядке действий в сложившихся чрезвычайных условиях;
- эвакуационные мероприятия;
- меры по инженерной защите населения;

- меры радиационной и химической защиты;
- медицинские мероприятия;
- подготовку населения в области защиты от чрезвычайных ситуаций.

Эвакуация относится к основным способам защиты населения от чрезвычайных ситуаций, а в отдельных ситуациях (катастрофическое затопление, радиоактивное загрязнение местности) этот способ защиты является наиболее эффективным. Сущность эвакуации заключается в организованном перемещении населения и материальных ценностей в безопасные районы.

Виды эвакуации могут классифицироваться по разным признакам:

- видам опасности — эвакуация из зон возможного и реального химического, радиоактивного, биологического заражения (загрязнения), возможных сильных разрушений, возможного катастрофического затопления и других;
- способам эвакуации – различными видами транспорта, пешим порядком, комбинированным способом;
- удаленности — локальная (в пределах города, населенного пункта, района), местная (в границах субъекта Российской Федерации, муниципального образования), региональная (в границах федерального округа), государственная (в пределах Российской Федерации);
- временным показателям — временная (с возвращением на постоянное местожительство в течение нескольких суток), среднесрочная (до 1 месяца), продолжительная (более 1 месяца);
- в зависимости от времени и сроков проведения выделяются следующие варианты эвакуации населения: упреждающая (заблаговременная) и экстренная (безотлагательная).

Средства индивидуальной защиты (СИЗ) – это предмет или группы предметов, предназначенные для защиты (обеспечения безопасности) одного человека от радиоактивных, опасных химических и биологических веществ, а также светового излучения ядерного взрыва.

По назначению СИЗ подразделяется на средства индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) и средства защиты кожи (СЗК), принципу защитного действия — на средства индивидуальной защиты фильтрующего и изолирующего типов.

Медицинские мероприятия по защите населения представляют собой комплекс мероприятий (организационных, лечебно-профилактических, санитарно-гигиенических и др.), направленных на предотвращение или ослабление поражающих воздействий чрезвычайных ситуаций на людей, оказание пострадавшим медицинской помощи, а также на обеспечение санитарно-эпидемиологического благополучия в районах чрезвычайных ситуаций и местах размещения эвакуированного населения.

### **5.5. Пожарная безопасность**

Осуществление государственного пожарного надзора возложено на Государственную противопожарную службу, в число основных задач которой входят:

- организация разработки государственных мер и нормативного регулирования в области пожарной безопасности;
- тушение пожаров и проведение связанных с ними аварийно-спасательных работ;
- профессиональная подготовка кадров для Государственной противопожарной службы.

Пожары или взрывы в зданиях и сооружениях могут возникать либо в результате взрыва технологического оборудования, находящегося в этих зданиях и сооружениях, либо в результате пожара или взрыва непосредственно в помещении, в котором используются горючие вещества и материалы.

Причинами образования взрывоопасной среды в технологическом оборудовании могут быть:

- некоторые технологические процессы в нормальном режиме (окисление органических жидкостей, окрасочные и сушильные камеры, пневмотранспортировка измельченных материалов и т.п.);

- подсос воздуха в аппараты, находящиеся под разряжением (вакуумные ректификационные колонны);
- мойка и очистка деталей в растворителях.

Причинами образования взрывоопасной среды непосредственно в помещении могут быть: выброс или утечка горючего газа, легковоспламеняющейся жидкости или горючей пыли из технологического оборудования в результате неисправности аппаратуры, потери прочности, неправильной деятельности персонала, внезапного отключения вентиляции и других причин.

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

Оценка пожаровзрывоопасности различных объектов заключается в определении возможных разрушительных воздействий пожаров и взрывов на эти объекты, а также опасных факторов пожаров и взрывов на людей. Определение таких опасных воздействий на стадии проектирования объектов определяется на основе нормативных требований, разработанных соответствующими государственными органами с учетом наиболее жестких (то есть наиболее опасных) условий протекания и проявления пожаров и взрывов, то есть с учетом аварийных ситуаций.

Существует два подхода к нормированию в области обеспечения пожаровзрывобезопасности:

- детерминированный;
- вероятностный.

Детерминированный подход основан на распределении объектов по степени опасности, определяемой по параметру, характеризующему

разрушающие последствия пожара и взрыва, на категории и классы. При этом назначаются конкретные количественные границы этих категорий и классов. Нормативный документ НПБ-105-95.

Вероятностный подход основан на концепции допустимого риска и предусматривает недопущение воздействия на людей опасных факторов пожара и взрыва с вероятностью, превышающей нормативную. Нормативный документ – ГОСТ 12.1.004-91.

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

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

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

На рисунке 14 представлен план эвакуации при пожаре и других ЧС из кабинета 315.



Рисунок 13 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из кабинета 315.

## 5.6. Организационные мероприятия обеспечения безопасности

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

Площадь на одно рабочее место с компьютером и другими приборами для взрослых пользователей должна составлять не менее 6 м<sup>2</sup>, а объем не менее -20 м<sup>3</sup>.

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

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

Поверхность пола в помещениях эксплуатации компьютеров и других световых приборов должна быть ровной, без выбоин, нескользкой, удобной для

очистки и влажной уборки, обладать антистатическими свойствами. В помещении должны находиться аптечка первой медицинской помощи.

### **5.7. Правовые вопросы обеспечения безопасности**

Основной задачей регулирования проектных решений разрешается за счет соблюдения законов. Руководитель принимает обязательства выполнения и организации правил эвакуации и соблюдение требования безопасности в помещении.

Требования к размещению лазерных изделий, организации рабочих мест и помещениям – в соответствии с настоящим стандартом и ГОСТ 12.3.002-75.

Расстояние между установками должны обеспечивать безопасные условия труда и удобства при эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте.

Рабочее место обслуживающего персонала, взаимное расположение всех элементов (органов управления, средств отображения информации, оповещения и др.) должны обеспечивать рациональность рабочих движений и максимально учитывать энергетические, скоростные, силовые и психофизиологические возможности человека.

Следует предусматривать наличие мест для размещения съемных деталей, переносной измерительной аппаратуры, хранение заготовок, готовых изделий и др.

Рабочий день должен быть нормирован, до 8 часов в одну смену.

Помещения должны соответствовать требованиям пожарной безопасности и иметь необходимые средства предотвращения пожара и противопожарной защиты.

Отделку помещений следует выполнять только из негорючих материалов. Не допускается применение глянцевых, блестящих, хорошо (зеркально) отражающих излучение материалов (коэффициент отражения рекомендуется не более 0.4).

Высота помещений должна быть не менее 4.2 м. Коммуникации (вода, электроэнергия, воздух, вакуум системы, инертные газы и др.) следует

прокладывать под полом в специальных каналах с защитными коробами (возвышение над уровнем пола не допускается) или подвешивать кабели на высоте не менее 2.2 м от пола.

Помещения должны иметь приточно-вытяжную вентиляцию. При необходимости, рабочие места должны быть оборудованы местной вытяжкой с целью исключения попадания в рабочее помещение вредных продуктов.

## Приложение А

### Раздел №1 Литературный обзор

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ51	Гончаров А.В.		

Консультант кафедры ОТСП:

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Слободян Михаил Степанович	Кандидат технических наук		

Консультант – лингвист кафедры ИЯФТ:

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Казанцев Андрей Юрьевич	Кандидат филологических наук		

## **1.1 Plasma surfacing**

Plasma surfacing is the process of coating with a plasma jet when the part is included in the load current circuit. In this case, with the help of a plasma jet, the surface of the renewable part and the applied material are heated. The material is moved by a plasma jet. Its temperature can exceed 20.000 K.

When plasma surfacing, in contrast to argon-arc surfacing, the electric arc is compressed by the walls of the water-cooled nozzle. The gas blown through this arc acquires the properties of plasma - it becomes ionized and electrically conductive. The gas layer in contact with the nozzle walls is intensively cooled, loses electrical conductivity and performs electrical and thermal insulation functions, which leads to a decrease in the diameter of the plasma jet, which is 0.7 times the diameter of the nozzle.

As a plasma-forming gas, argon is often used. Surfacing with the replacement of argon with air (up to 90%) significantly reduces the cost of repairing parts. For plasma surfacing in air, iron-based powder alloys have been developed, which include strong deoxidizers and nitride-forming elements.

The essence of the method is that the energy density, which is transferred to the heated surface, is much larger than from the open arc. This leads to the fact that the rate of heat input into the part is higher than the rate of heat transfer. Therefore, the surface of the part melts quickly. The process is characterized by low penetration and high thermal efficiency.

Advantages compared to other methods of coatings are as follows:

- smooth and even surface of coatings allows leaving allowance for processing 0.4...0.9 mm;
- A small penetration depth and a small zone of thermal influence determine the proportion of the base metal in the coating to 5%;
- small heat input into the workpiece ensures small deformations and thermal effects on the structure and bases;
- during restoration, high wear resistance of the welded surfaces is ensured;
- the fatigue strength of the parts is reduced by 10...15%, which is much less than using some other types of surfacing;

- the possibility of obtaining the thickness of the fusion layer from 0.1 mm to several millimeters;

- relatively high efficiency of the arc (0.2...0.45).

Materials for plasma surfacing are very diverse, including iron-carbon alloys, stellite, tool and high-speed steels. Apply twigs, wire, powders and a combination of materials.

Good results when restoring parts by plasma surfacing give the use of powder materials. In this case:

- It is possible to vary within a wide range of coating thickness, speed (0.5-25 m / min) and surfacing productivity (0.6-15 kg / h), seam width and weld metal composition due to changes in the materials used and process regimes;

- It is easy to control the introduction of heat into the material of the part and the depth of its penetration, regardless of the supply of material;

- It is easier to choose a filler material to produce coatings (including composites) of various compositions and structures with specified properties by mixing different powders;

- a minimum allowance for machining of coatings is achieved;

- Automation of the process is possible;

- the longest continuous operation of equipment for plasma-powder surfacing is provided in comparison with argon-arc and gas-flame surfacing.

Plasma surfacing has found application in the restoration of critical parts, which include, for example, cranked, cam and camshafts, shafts of turbochargers, axles, crossings of cardan joints, equipment guides, cheeks and saddle bolts, extruder screws,

The field of application of the method is the application of thin-layer coatings to the loaded parts with low wear.

Plasma surfacing of thin-layer coatings is a competition to the processes of applying galvanic coatings.

In plasma surfacing, coatings of thickness 0.2...0.6 mm and a width of 1.2...45 mm are obtained. If a low-melting material is applied, it is possible to apply a coating to penetrate very thin surface layers without melting the surface.

The thermal efficiency of surfacing is 2...3 times higher than in the electric arc process. The process productivity is 0.4...5.5 kg / h. The productivity of plasma-powder surfacing of austenitic stainless steels is not inferior to the productivity of electric arc surfacing.

Plasma surfacing using a filler material in the form of a powder can be carried out in several ways. The simplest of these is the method of surfacing a layer of coarse-grained powder (grits). In this case, the powder is poured in advance onto the surface to be welded, and the plasma arc burning between the electrode and the article melts it.

When surfacing with the supply of powder in the weld pool, the arc burns between the electrode and the product. On the product, a base metal bath is formed, where a refractory metal powder is fed. This method is applied when it is necessary that particles of refractory materials are embedded in the metal matrix of the article.

Surfacing with blowing powder into the arc involves feeding the powder into the plasma jet, melting it in this jet and transferring it to the surface of the product, heated and melted by an arc of direct action.

## **1.2 Process parameters and features of the technology of plasma-powder cladding**

In general, the process of plasma-powder overlaying is characterized by the following technological parameters: the arc current  $I$ , the voltage  $U$ , the deposition rate  $V_H$ , the amplitude of the oscillations of the plasma torch  $A$ , the oscillation frequency of the plasma torch  $G$ , the granulation of the powder  $d$ , the mass flow rate of the powder  $G_{\Pi}$ , the plasma-forming, transporting and protective gases and their flow  $q_{\PiЛ}$  respectively,  $q_{Tp}$ ,  $q_3$ , the distance from the plasma torch to the product  $h$ ,  $d_{BH}$  inner diameter and an outer nozzle of the plasma torch,  $d_H$ , preheating temperature of the deposited items  $T_{\Pi OД}$ .

One of the most important advantages of plasma-powder welding is the possibility of ensuring a very small penetration of the base metal, which has already been noted in the first publications on plasma-powder surfacing.

The authors investigated the dependence of the penetration of the parent metal on the most important parameters of the regime. In addition to the purely applied value, these experiments made it possible to better understand the mechanism of formation of the deposited layer in plasma-powder surfacing.

The current strength of the arc of direct action  $I_{\Pi}$  has the greatest influence on the proportion of the base metal in the weld. This is especially noticeable when surfacing with a low mass powder feed rate (up to 2 kg / h). With an increase in the feed rate of the powder, it manifests itself to a lesser extent - the range of current that ensures the permissible penetration of the base metal expands.

The current of the indirect arc  $I_{\kappa}$  practically does not affect the penetration of the base metal, which agrees well with the results of calorimetric studies. It is noted, however, that if the temperature of the plasma torch is too low, the stability of the plasma torch decreases. For large values of  $I_{\kappa}$ , the thermal load on the plasma-forming nozzle greatly increases. From this point

There is some optimal value of the current strength of the indirect arc, equal to 70-100 A.

With an increase in the flow rate of the plasma-forming gas  $q_{\Pi J}$ , the fraction of the base metal  $Y_0$  in the weld metal increases. The effect of  $q_{\Pi J}$  on the penetration of the parent metal is mainly due to the pressure of the plasma arc on the weld pool, since the effective thermal power of the arc changes only by 10-15% in the investigated limits in the investigated range.

At the same time, the velocity of plasma flows in the arc increases more than twofold. It is obvious that the consumption of the plasma-forming gas during surfacing should be kept as small as possible. Its value is chosen from the conditions for ensuring stability of arc burning and stability of the surfacing process. In practice  $q_{\Pi J} = 1-2 \text{ l / min}$ .

The flow rate of the transport gas  $q_{\text{TP}}$  in the range 4-9 l / min influences the fraction of the base metal in the welded roller  $Y_0$  similarly to the plasma-forming gas, but noticeably weaker. A further increase in  $q_{\text{TP}}$  does not lead to an increase in penetration.

As the flow rate of the carrier gas increases, the powder losses increase due to an increase in the initial particle velocity and deterioration of the heating conditions in the arc. With a low flow rate of the transport gas (3-4 l / min), the surfacing process is often disrupted due to the powder plugging of the plasmatron channels. The optimum flow rate of the transport gas is 6-9 l / min.

Amplitude and vibration frequency of the plasma torch within the limits studied ( $A = 2.5-16$  mm,  $G = 8-87$  min<sup>-1</sup>) only slightly affect the penetration of the base metal. So, for example, when the amplitude of oscillations changes within the limits of 2-16 mm, the value of  $Y_0$  varies within the range of 12-17%. On the basis of this, the amplitude of the oscillations of the plasma torch  $A$  should be chosen on the basis of the required width of the deposited bead, taking into account, however, that the width of the platen exceeds the value of  $A$  by 5-8 mm. The oscillation frequency must be consistent with the deposition rate in such a way that the oscillation step is 2-5 mm.

When the distance from the plasma torch to the product  $h$  varies from 7 to 22 mm, the penetration of the base metal remains practically constant, which is an important advantage of plasma surfacing. Considering that with increasing distance  $h$  the protection of the welding bath deteriorates and the powder losses increase, it is recommended to keep it at 8-15 mm.

The quantity  $Y_0$  largely depends on the mass flow rate of the powder  $G_{\text{II}}$  (at constant values of the remaining process parameters). In practice, the supply of powder is selected simultaneously with the deposition rate, so the influence of these two factors should be considered together.

With an increase in the deposition rate  $V_{\text{II}}$  in the interval 1.7-32 m / h, the value of which depends on the current strength, the mass flow rate of the powder and the amplitude of the oscillations, the fraction of the base metal remains almost constant,

and then decreases. When increasing the deposition rate, in order to maintain a constant thickness of the deposited layer, it is necessary to increase the speed of the powder supply. In this case, to ensure the melting of a larger amount of powder, it is also necessary to increase the current strength of the arc of direct action. As a result of a simultaneous increase in  $V_H$ ,  $G_{II}$ , and  $I_{II}$  (under the condition of retaining the thickness of the fused layer),  $Y_0$  increases. Hence it follows that the surfacing productivity of a layer of a certain thickness is limited by the permissible value  $Y_0$ .

The choice of optimal modes of plasma-powder overlaying is reduced, mainly, to the determination of the current intensity of the arc of direct action  $I_{II}$ , the mass flow rate of the powder  $G_{II}$  and the deposition rate  $V_H$ . The values of the other mode parameters ( $I_K$ ,  $q_{IIJ}$ ,  $q_{TP}$ ,  $h$ ) should be kept constant in the above limits. The amplitude of the transverse oscillations of the plasma torch A is set depending on the required width of the deposited bead, and the oscillation frequency G is determined depending on the deposition rate.

The productivity of surfacing. When plasma-powder overlaying increases with an increase in the current of the plasma arc, the productivity rises faster than with an arc surfacing by a consumable electrode. If the shape and dimensions of the welded part do not limit the surfacing current, then the plasma-powder surfacing of layers thicker than 3 mm thick is limited only by the maximum permissible operating value of the plasma torch current and the maximum possible powder supply, i.e. Such a feed, in which the channels and nozzles of the plasma torch are not clogged.

The production rate of thin layers depends to a large extent on the allowable dilution of the weld metal by the main one. The thinner the layer and the smaller the set value  $Y_0$ , the lower the productivity, determined by the weight of the weld metal per unit time.

Loss of powder. Not all powder particles moving along the periphery of the arc column enter the weld pool. Those that fall on the surfaced surface in front or on the side of the weld pool, as a result of the elastic rebound from this surface, are irretrievably lost. Loss of powder will be less if the weld pool leaks under the arc. This is observed when the base metal is well wetted by the metal of the weld pool, at a low

deposition rate, for surfacing on descent, at a large thickness of the weld bead, etc. Powder losses increase if the plasmatron is located or periodically approaches close to the edge of the welded part, if the width of the substrate is smaller than the diameter of the nozzle, etc.

It follows that the powder losses depend on many parameters of the regime:  $I_{\Pi}$ ,  $V_H$ ,  $G_{\Pi P}$ ,  $q_{\Pi L}$ ,  $q_{TP}$ ,  $d_{BH}$ ,  $d_H$  etc., which determine the nature of motion and the intensity of melting of the powder in the plasma arc, the size of the weld pool and the presence of a layer of liquid metal under the arc. However, of the listed parameters, the current loss  $I_{\Pi}$  and the transport gas flow  $q_{TP}$  are mainly influenced by powder losses. At optimum modes of surfacing they do not exceed 5-8%.

The dimensions and shape of the weld beads are determined mainly by the mass flow rate of the powder, the amplitude of the transverse oscillations of the plasma torch, the deposition rate and the arc current of direct action. Influence of other parameters is insignificant.

As experience shows, the thickness of the roller with a single-layer surfacing should not exceed 5-6 mm, otherwise there will be turnings and non-melting along its edges. The minimum thickness of the welded layer at  $Y_0 < 10\%$  is approximately 0.5 mm. Surfacing of thinner layers (0.25-0.30 mm) [14] has not received practical application. If a relatively large penetration of the base metal is allowed, then plasma-powder surfacing with a small strengthening of the roller does not present any difficulties.

Plasma-powder surfacing, as a rule, is carried out with transverse vibrations of the plasma torch, therefore the width of the roller is determined mainly by the amplitude of the oscillations and reaches 55-60 mm. When surfacing without oscillation, the width of the roller is 3-6 mm, depending on the diameter of the focusing nozzle and the current.

Quality of the weld metal. Due to the small penetration and insignificant combustion of the alloying elements, the chemical composition of the weld metal already in the first layer corresponds to the composition of the filler powder. The homogeneity of the chemical composition of the pulverized powders and the high

stability of the plasma surfacing regime ensure the high quality and uniformity of the chemical composition of the weld metal.

The microstructure of the metal deposited by the plasma-powder method is characterized by a small width of the transition zone from the base metal to the deposited one. In most cases, a typical structure for welded metal is noted. However, by changing the effective thermal power of the plasma arc and the granulometric composition of the powder accordingly, the directed growth of columnar crystallites can be suppressed.

The appearance of pores and non-metallic inclusions in the weld metal is associated either with poor quality of the filler powder or with unsatisfactory protection of the weld pool. Special preparation before surfacing for filler powder is not required. It is only necessary to check the granulometric composition of the powder and dry it, if the warranty storage period is exceeded. Preparation of the base metal consists in cleaning the surface to be welded from rust and contamination, it is also necessary not to allow excessive oxidation of it when heated before surfacing.

For plasma-powder overlaying, a lesser tendency to form crystallization cracks is characteristic than for arc surfacing by a consumable electrode, which is explained by a more favorable thermal cycle, caused, in particular, by transverse oscillations of the plasma torch.

As a rule, plasma surfacing with powder is used in the manufacture of new parts, most often in place of acetylene-oxygen or argon-arc surfacing with rod additives or manual arc surfacing. However, in many cases, it apparently can successfully compete with mechanized arc surfacing. This method of surfacing provides a significant (up to 3-5, in some cases - up to 12 times) increase in labor productivity, a reduction in the consumption of surfacing materials and an improvement in the quality of the weld metal.

Plasma surfacing with a powder is particularly effective in a batch production. Abroad, it is used in the manufacture of valves and saddles of internal combustion engines, parts of pipeline fittings, extruder worms, screws, glass industry components, roller bit supports, locks and drill pipe couplings, centralizers and other parts of drilling

equipment, metal cutting knives, rolling rolls , Stamps, firmwares, mixer rotors, chains of chain saws, protective bushings of centrifugal pumps, parts of steam turbines, elements of equipment of nuclear power plants and chemical enterprises, etc.

Plasma-powder surfacing is also used in the manufacture of valves for internal combustion engines for various purposes, starting with the valves of the engines of passenger cars (the diameter of the plate is not more than 30 mm) and ending with the valves of powerful marine diesel engines with a plate diameter of more than 200 mm.

## **Заключение**

На основании анализа литературных источников были определены основные параметры режима плазменно-порошковой наплавки, оказывающие наиболее сильное воздействие на размеры, микроструктуру, качество и свойства получаемых покрытий.

В работе были составлены планы полных факторных экспериментов  $2^3$  и  $2^4$ . Проведен анализ и статистическая обработка результатов экспериментов и построены адекватные математические модели (уравнения регрессии) связывающие основные параметры режима наплавки с размерами и микроструктурными характеристиками получаемых покрытий.

Разработан алгоритм оптимизации режима плазменно-порошковой наплавки. В качестве параметра оптимизации предложена площадь наплавленного металла, как характеристика, отражающая полноту перехода присадочного порошка в ванну расплава. Высота наплавленного слоя в алгоритме задается равным конкретному значению, а остальные макро и микроструктурные характеристики покрытия ограничиваются величинами, обеспечивающими высокие износостойкие свойства покрытий при их работе в контакте с абразивом.

На заключительном этапе работы было разработано программное обеспечение, осуществляющее автоматический поиск оптимального режима плазменно-порошковой наплавки Fe-Cr-V-Mo-C покрытия.

## Список использованных источников

1. Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.П., Константинов В.М. Восстановление деталей машин: Справочник; под ред. Иванова В.П.-М.: Машиностроение, 2003. - 672 с.
2. Вайнерман А. Е., Шорохов М. Х., Веселков В. Д., Новосадов В. С. Плазменная наплавка металлов, изд-во «Машиностроение», 1969 г., 192 стр.
3. Гладкий П. В., Переплётчиков Е. Ф., Рябцев И.А. Плазменная наплавка. - Киев: Экотехнология, 2007. - 292 с.
4. Zuchowski R. S., Culbertson R. P. Plasma arc weld surfacing // *Welding Journal* – 1962. – 41. – #6. – P. 548-555.
5. Witting E. Grundlagen and Anwendungen der Plasma-Ver-fahren // *Schweissen and Schneiden* – 1962. – 14. – №5. – S. 193-200.
6. Переплётчиков Е. Ф., Гладкий П. В. О влиянии параметров плазменно-порошковой наплавки на проплавление основного металла / Высокопроизводительные процессы наплавки и наплавочные материалы. – Коммунарск, 1973. – С. 19-25.
7. EuTronic CAP. Castolin+Eutectic-Institut // St. Sulpice. – 1981. – Dok. 4583-0819-1500-DN. – 6 s.
8. Desir J. L. Utilisation des arcs plasma pour les revetemens de potecion anti-usure dans lindusrie // *Z. Schweibtechnik*. – 1979. – 69. – № 11 – S. 307-314.
9. Переплетчиков Е. Ф. Плазменная наплавка // *Сварщик*. – 2000 – № 2. – С. 8-11.
10. Переплетчиков Е. Ф. Плазменно-порошковая наплавка клапанов двигателей внутреннего сгорания // *Автоматическая сварка*. — 2002. — № 1. — С. 45-46.
11. Технология плазменно-порошковой наплавки выпускных клапанов двигателей автомобилей «ВАЗ» / С. Р. Аманов, А. В. Каргин, Д. Ю. Копылов, Б. Н. Переведенцев // *Сварочное пр-во*. — 2005. — № 2. — С. 33-40.

12. Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – «Наука» – Москва, 1976 г., 278 с.
13. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов, М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
14. Ф. П. Васильев Методы оптимизации. – М.: Издательство «Факториал пресс», 2002. – 824 с.
15. Лащенко Г.И. Плазменное упрочнение и напыление – Киев: Экотехнология, 2003. – 64 с.
16. Полякова Н. С. Математическое моделирование и планирование эксперимента: метод. указания / – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 33, [3] с.
17. Зажигаев Л. С., Кишьян А. А., Романиков Ю. И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. М., Атомиздат., 1978, с. 232.
18. Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М., «Наука», 1976, с. 390.
19. Эйткен П. Г. Интенсивный курс программирования в Excel.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс» , 2004. – 432 с.: ил. – Парал. тит. англ.
20. С. Роман. Использование макросов в Excel – Спб.: Питер, 2004. – 507 с.