

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи

**Верхорубов Вадим Сергеевич**

**ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ОПЛАВЛЕНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ  
МЕТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Fe-C-Cr-Ti-Al**

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
Коробов Юрий Станиславович

Екатеринбург – 2015

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА .....	8
1.1. Износ и материалы рабочих органов .....	8
1.2. Методы нанесения износостойких покрытий и их последующей модификации .....	11
1.3. Математическое моделирование как инструмент совершенствования технологии оплавления износостойких металлизационных покрытий .....	24
1.4. Выводы по главе .....	35
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОМПОЗИЦИИ «ПОКРЫТИЕ – ОСНОВА» ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СЖАТОЙ ДУГИ .....	37
2.1. Разработка математической модели .....	37
2.2. Анализ влияния параметров режима плазменной обработки и свойств покрытия на распространение теплоты в композиции «покрытие – основа» ....	44
2.3. Анализ структурных превращений при оплавлении металлизационного покрытия на основе результатов моделирования .....	54
2.4. Выводы по главе .....	58
3. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, ОПЛАВЛЕННЫХ ПЛАЗМОЙ .....	60
3.1. Материалы для исследования .....	60
3.2. Методы исследования .....	63
3.3. Результаты исследования и их анализ .....	65
3.4. Выводы по главе .....	86
4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ .....	88
4.1. Описание конструкции и упрочняемого рабочего органа .....	88
4.2. Разработка технологии упрочнения .....	90
4.3. Эксплуатационные испытания упрочненных рабочих органов почвообрабатывающих машин .....	95
4.4. Выводы по главе .....	102

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	103
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	106
Приложение А – Листинг разработанной модели в MathCad 14 .....	117
Приложение Б – Результаты расчета по математической модели .....	120
Приложение В – Акт о внедрении результатов диссертационной работы .....	121
Приложение Г – Акт эксплуатационных испытаний .....	122

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность работы**

Абразивный износ является одним из основных факторов, ограничивающих ресурс работы деталей, узлов машин и оборудования различного назначения.

С целью повышения абразивной износостойкости применяют различные методы обработки рабочей поверхности. Перспективным направлением создания защитных покрытий, является дуговое напыление, но металлизационное покрытие быстро разрушается под воздействием абразива, в результате микрорезания и отслоения его частиц с недостаточной когезионной прочностью.

Существует ряд способов уменьшения или устранения недостатков металлизационных покрытий. Наиболее привлекательным с точки зрения технико-экономических показателей является последующая плазменная обработка.

Однако влияние плазменного поверхностного оплавления на свойства напыленных покрытий на основе железа и процесс распространения тепла в композиции «покрытие – основа» не изучены, что затрудняет применение данной технологии. Для определения влияния параметров режима плазменной обработки на свойства напыленного покрытия после оплавления удобно воспользоваться таким инструментом, как математическое моделирование, позволяющее определить распределение температур в композиции, термический цикл обработки и скорости нагрева и охлаждения материала.

К деталям подверженным интенсивному износу в процессе эксплуатации, в частности, относятся рабочие органы почвообрабатывающих машин. На интенсивность изнашивания таких орудий оказывают влияние однородность, влажность и плотность почвы, форма и скорость движения рабочих органов, а также материалы из которых они изготовлены. Годовые затраты на поддержание исправного состояния сельскохозяйственной техники составляют (млрд. руб.):

1,2 для плугов, 2,5 для культиваторов и 2,7 для сеялок. Высокие скорости износа лемехов и потребность в них колхозов, а также простота их монтажа/демонтажа на плуг делают их идеальным объектом для проведения натурных испытаний.

Актуальность работы подтверждается тем, что она выполнялась в рамках федеральной программы «У.М.Н.И.К.» проект № 0005151 «Разработка технологии плазменной модификации напыленных покрытий на основе железа».

### **Степень разработанности темы исследования**

Проблемам улучшения характеристик напыленных покрытий путем последующей обработки высококонцентрированными источниками нагрева посвящены труды В.Н. Анциферова, М.А. Геллера, Д.В. Губарькова, В.А. Клименова, А.А. Митрофанова, А.В. Похмурской, Н.В. Спиридонова, Е. Chikarakara, Chong Cui, Shi-Hong Zhang, Qun Wang, B.S. Yilbas. Их работы в значительной мере способствовали изучению влияния последующей термической обработки на свойства газотермических покрытий. Однако в трудах этих ученых не рассматривается влияние плазменной обработки на характеристики покрытий из экономнолегированных сплавов.

**Цель работы** заключается в изучении влияния плазменного оплавления на повышении абразивной износостойкости покрытий системы Fe-C-Cr-Ti-Al, полученных дуговой металлизацией.

Для достижения намеченной цели в процессе выполнения работы были решены следующие **задачи**:

- разработать математическую модель тепловых процессов в системе «неоднородное покрытие – сплошное тепло» под воздействием высококонцентрированного источника нагрева, применительно к плазменной обработке, с целью определения параметров режима;
- определить закономерности влияния плазменной обработки на характеристики структуры и их связь с физико-механическими и служебными свойствами покрытий системы Fe-C-Cr-Ti-Al;
- на основе полученных данных разработать технологию плазменного оплавления металлизационных покрытий на основе железа для повышения их

абразивной износостойкости, применительно к рабочим органам сельскохозяйственной техники, для продления их срока службы.

### **Методология и методы диссертационного исследования**

В теоретических исследованиях использованы аналитические расчеты, по разработанной автором математической модели, выполненные в пакете MathCad 14. Экспериментальные исследования выполнены по стандартным методикам, на верифицированном оборудовании, и включали в себя: металлографический анализ, сканирующую электронную микроскопию, рентгеноструктурный фазовый анализ, волнодисперсионный и энергодисперсионный микрорентгеноспектральный анализ, фотоэлектрический спектральный метод, замеры микротвердости, механические испытания по определению абразивной износостойкости по закрепленному абразиву. Натурные испытания износостойкости металлизационных покрытий после плазменного оплавления проведены на рабочих органах почвообрабатывающих машин.

### **Научная новизна работы:**

– разработана математическая модель распространения тепла в системе «неоднородное покрытие – сплошное тепло», под воздействием плазменного источника нагрева, с учетом параметров режима плазменной обработки, а также влияния пористости и оксидных прослоек на теплофизические свойства покрытий;

– на основе анализа расчетов, полученных при моделировании, установлен характер зависимости геометрических размеров зоны оплавления от параметров режима плазменной обработки, а также влияние химического состава и неоднородности покрытий на их теплофизические характеристики;

– установлено, что износостойкость металлизационных покрытий после плазменного оплавления в 2 раза выше наплавленных слоев того же состава, что связано с полным окислением алюминия и титана, способствующим образованию структуры мартенсита с упрочнением дисперсными карбидами хрома.

**Теоретическая и практическая значимость:**

- на основе разработанной математической модели создан программный комплекс, позволяющий отследить влияние параметров режима плазменной обработки на структурные и геометрические параметры зоны оплавления в композиции «металлизационное покрытие – основа»;
- установлено влияние плазменного оплавления на структурные и физико-механические характеристики металлизационного покрытия системы Fe-C-Cr-Ti-Al;
- на основе полученных данных разработана технология плазменного оплавления металлизационных покрытий;
- по разработанной технологии изготовлены опытные рабочие органы почвообрабатывающих машин, прошедшие эксплуатационные испытания.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- математическая модель процесса плазменного оплавления металлизационного покрытия, описывающая влияние параметров режима обработки на геометрию и структурные характеристики оплавленной зоны;
- результаты исследования физико-механических и служебных свойств металлизационных покрытий из порошковой проволоки системы легирования типа Fe-C-Cr-Ti-Al до и после плазменного оплавления;
- технология плазменного оплавления металлизационного покрытия, обеспечивающая значительное повышение абразивной износостойкости, применительно к рабочим органам почвообрабатывающих машин.

**Степень достоверности и апробация результатов**

Степень достоверности расчетов, выполненных по разработанной модели, подтверждается экспериментальными данными, полученными на современном оборудовании в аттестованных лабораториях, и обладает достаточной точностью для оценки области рациональных параметров режима плазменной обработки. Достоверность лабораторных исследований полученных покрытий

подтверждается их апробацией на практике в ходе эксплуатационных испытаний.

Основные результаты работы были доложены и обсуждены на региональных, всероссийских и международных конференциях по сварке и родственным технологиям: 12-й, 13-й и 14-й научно-технических конференциях «Сварка. Контроль и диагностика» (Екатеринбург, 2012 г., 2013 г., 2014 г.); национальной научно-технической конференции (Москва, 2012 г.); VI Уральской научно-практической конференции «Сварка. Реновация. Триботехника.» (Н. Тагил, 2013 г.); международной научно-технической конференции «Сварка и контроль» (Пермь, 2013 г.); международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы прочности» (Екатеринбург, 2013 г.); международной конференции «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее» (Украина, Киев, 2013 г.); всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инженерная мысль машиностроения будущего» (Екатеринбург, 2013 г.); всероссийской научно-практической конференции «Современные наукоемкие инновационные технологии» (Самара, 2014 г.); всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной науки и техники» (Пермь, 2015 г.); научно-практической конференции с международным участием «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР» (Екатеринбург, 2015 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 4 публикации в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов по каждой главе, общих выводов по работе, библиографического списка из 112 наименований и 4 приложений. Работа изложена на 122 страницах печатного текста, включает 46 рисунков, 19 таблиц.



# 1. МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА

## 1.1. Износ и материалы рабочих органов

Изнашиванием называется процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличение его остаточной деформации при трении, проявляющемся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела. Износ рабочих органов машин и механизмов может быть вызван воздействием агрессивных сред, большим перепадом температур и давлений, высокими вибрационными нагрузками и их различными комбинациями.

Механизм разрушения рабочей поверхности контактирующих тел зависит от природы взаимодействующих тел и условий трения. Различают следующие элементарные виды разрушений [1]:

- царапание;
- микрорезание;
- отслаивание;
- выкрашивание (питтинг);
- глубинное вырывание;
- перенос материала.

В зависимости от условий работы виды изнашивания можно классифицировать по характеру воздействия на поверхность трения следующим образом [2, 3]:

- механическое – абразивное, гидроабразивное, гидроэрозионное, кавитационное, усталостное, при фреттинге, при заедании;
- коррозионно-механическое – окислительное, коррозионное растрескивание, при фреттинг-коррозии;
- под действием электрического тока.

В большинстве узлов и деталей машин реализуется механическое изнашивание рабочей поверхности. С этим связано разнообразие схем механического нагружения, при которых происходит эксплуатация детали.

Для многих типовых условий работы деталей машин самым распространенным видом изнашивания является абразивное [1]. Абразивному изнашиванию подвергаются детали сельскохозяйственных, дорожно-строительных, горных, транспортных машин и транспортирующих устройств, узлы шасси самолетов, металлорежущих станков, рабочие колеса и направляющие аппараты гидравлических турбин, лопатки газовых турбин, турбины и насосы землеснарядов, бурильное оборудование нефтяной и газовой промышленности и т.п.

Абразивным называется изнашивание поверхности детали под воздействием режущего, деформирующего или царапающего действия твердых частиц, обладающих различной формой, размерами и твердостью. В качестве таких частиц могут выступать песок, электрокорунд, окалина или твердые структурные составляющие одной из сопряженных поверхностей.

Разрушение поверхности может возникать в результате снятия стружки или многоактного взаимодействия поверхности детали с абразивными частицами.

Условиям интенсивного абразивного износа соответствуют рабочие органы почвообрабатывающих машин, так как в процессе эксплуатации они находятся в непосредственном контакте с твердыми частицами (HV 8–11 ГПа), содержащимися в почве. Быстрее всего при вспашке, культивации и других видах обработки почвы изнашиваются и затупляются режущие части рабочих органов сельскохозяйственных машин такие как: лапы культиваторов, лемеха, ножи фрез, полки, диски борон, полевые доски и др. Это приводит к ухудшению качества обработки почвы, снижению производительности труда и увеличению расхода топлива [4].

Износ рабочих органов почвообрабатывающих машин характеризуется незначительной пластической деформацией поверхностных слоев металла,

химическим взаимодействием с различными элементами внешней среды (влага, гумус, кислород, углекислый газ), образованием и разрушением пленок окислов (вторичных структур), толщина которых составляет 0,01–0,05 мкм [5].

В зависимости от механического состава почвы и ее влажности рабочие органы почвообрабатывающих машин изнашиваются по толщине, ширине, длине, затупляются, изгибаются и ломаются [6]. Давление грунта на лезвия рабочих органов является динамичным и варьирующееся в диапазоне 3–16 кг/см<sup>2</sup> [7]. С повышением влажности почвы, ее мелких фракций, диаметром 0,25–1,00 мм, величина износа лемешных рабочих органов увеличивается.

В настоящее время серийные рабочие органы для почвообрабатывающих машины изготавливают из сталей 65Г, 45 и Л-53, которые в закаленном состоянии имеют твердость (37–43 HRC) и имеют удовлетворительные показатели относительного удлинения ( $\delta = 6,5–7,2 \%$ ), но небольшой предел прочности ( $\sigma_B = 880–1080$  МПа). Однако, применяемые материалы не обеспечивают достаточной стойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин, что говорит об актуальности применения дополнительной обработки или создания защитных покрытий способных противостоять тяжелым условиям эксплуатации.

Наибольшая скорость износа наблюдается на песчаных почвах с большим количеством каменистых включений. Как показывают результаты многочисленных испытаний лемехов на долговечность в условиях песков, от 15 до 50 % их выбраковывают от изгиба и поломки носка, не достигнув предельного состояния по износу. Интенсивность изнашивания на глинистых почвах в 6–7 раз меньше, чем на песчаных и супесчаных. На черноземных почвах наиболее интенсивно изнашивается режущая кромка лезвия лемеха. В результате этого лезвие затупляется и приобретает округлую форму [8]. Средняя наработка до отказа одного лемеха составляет 5,5–6,0 га [9], которой они достигают в среднем за 2–4 дня. Таким образом использование разработанных покрытий применительно к рабочим органам почвообрабатывающих машин позволяет в короткие сроки определить их эффективность на практике.

Актуальность данной задачи подтверждается также ежегодной потребностью колхозов Российской Федерации в рабочих органах для сельскохозяйственных машин [10]: в лемехах – 7 млн. шт., в полевых досках – 3 млн. шт., в отвалах – 2,4 млн. шт.

## **1.2. Методы нанесения износостойких покрытий и их последующей модификации**

В зависимости от условий работы деталей применяют различные виды сталей, как правило, высоколегированных, что существенно усложняет технологические процессы изготовления и приводит к увеличению расходов на готовое изделие [11, 12].

Одной из самых распространенных технологических операций является термическая обработка и она используется для упрочнения деталей в целом. При этом твердость металла можно получить в пределах 40–46 HRC для стали 45 и до 58–65 HRC для стали 65Г и легированных сталей. Но износостойкость таких рабочих органов ниже, по сравнению с аналогичными деталями, изготовленными из специальных материалов. Кроме того, на суглинистых почвах не происходит самозатачивание [13].

Сущность эффекта самозатачивания заключается в выборочном износе неоднородного по сечению лезвия, при котором сохраняется необходимая форма и режущие свойства рабочего органа [14]. Реализации эффекта самозатачивания способствует двухслойное строение рабочего органа, состоящего из несущего слоя твердостью 37–42 HRC и твердого слоя 52–60 HRC.

Орудия, прошедшие соответствующую термообработку, обладают высокой износостойкостью при одновременной прочности на излом и скол и хорошо работают в абразивных почвах с каменистыми компонентами. Так благодаря поверхностной закалке на глубину до 2 мм лемех имеет твердость в поверхностном слое 55–60 HRC, что значительно повышает его износостойкость.

В работах Ю.Д. Щицына и Д.С. Белинина доказана высокая эффективность плазменного поверхностного упрочнения на токе обратной полярности, за счет расширения обрабатываемой зоны и повышенного тепловложения при сравнительно не высоких значениях мощности сжатой дуги [15]. Однако технологии плазменного поверхностного упрочнения не нашли широкого применения для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин, так как высокое тепловложение приводит к значительным деформациям.

С целью повышения срока службы и обеспечения эффекта самозатачивания производятся биметаллические лемеха трапециевидной формы с двухслойной катанной лезвийной частью из стали Х6Ф1 (нижний слой) и Л-53 (верхний слой) [16]. Такие органы имеют повышенный срок службы, однако, их широкое внедрение затрудняется, в связи с высокой стоимостью изготовления.

Для упрочнения поверхности и повышения ресурса деталей используются различные методы нанесения износостойких покрытий. Одним из самых высокопроизводительных и эффективных способов получения металлических покрытий является наплавка. В процессе наплавки поверхностный слой обрабатываемой детали, а также наплавляемый материал, под действием тепла внешнего источника (дуга, газокислородное пламя, лазерное излучение, плазма) расплавляется на некоторую глубину. Расплавленные металлы основы и покрытия образуют общую жидкую ванну, таким образом, соединение происходит в жидкой фазе.

Уровень износостойкости наплавочных материалов в большей степени зависит от химического состава и твердости сплава. Однако, не все сплавы, обладающие высокой твердостью, показывают высокую абразивную износостойкость [17, 18]. Доказано, что износостойкость зависит в первую очередь от структурных факторов полученных сплавов, таких как: кристаллическая структура твердого раствора, степень дисперсности и природа образующихся фаз. Поэтому с целью повышения упрочняющей способности необходимо легировать наплавочные материалы элементами, обеспечивающими образование мелкодисперсных фаз и препятствующими разупрочнению

твердого раствора. В таблице 1.1 представлены основные наплавочные электроды, используемые для повышения износостойкости

Для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин предложено большое количество методов наплавки: точечная наплавка порошковой проволокой [19]; плазменная наплавка порошковых материалов на основе железа и никеля [20, 21]; способ индукционной наплавки [22, 23].

Таблица 1.1 – Химический состав электродов для износостойкой наплавки

№ п/п	Марка	Химический состав, %								Твердость, HRC
		C	Cr	Si	Mn	Ni	B	Mo	W	
1	ЦН-12М	0,1	16,3	4,1	4,0	7,9	-	5,7	-	47
2	ОЗН-6	1,0	4,4	3,7	2,6	-	0,9	-	-	48
3	ОЗШ-3	0,4	9,9	1,9	0,5	-	-	-	-	50
4	T-590	3,2	25,0	2,2	1,2	-	1,0	-	-	57
5	ОЗИ-3	0,8	3,6	0,4	0,5	-	-	4,0	1,4	50
6	ОЗН-7М	0,7	4,1	1,4	0,4	2,0	0,5	-	-	51
7	ЭН-60М	0,8	2,7	1,0	0,9	-	-	0,9	-	53

Метод дуговой наплавки отличается простотой реализации и низкой стоимостью, но при этом высокое тепловложение в основной материал может привести к значительным деформациям изделия.

Наибольшее распространение получили лемеха после закалки или с наплавкой износостойким сплавом – Сормайт №1 (таблица 1.2) [1]. Однако, многие исследователи продолжают поиск материалов и технологий, способных, при низких затратах, значительно продлить срок службы рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Таблица 1.2 – Химический состав и твердость сплава Сормайт №1

Содержание основных элементов, %						Твердость HRC
Fe	Cr	Mn	Ni	Si	C	
ост.	25,0–31,0	1,5	3,0–5,0	2,8–4,2	2,5–3,0	49–54

Особое место, среди методов обработки поверхности, занимают методы газотермического напыления (ГТН). Напыление представляет собой процесс нанесения покрытия на поверхность детали с помощью высокотемпературной скоростной струи, содержащей частицы порошка или капли расплавленного напыляемого материала, осаждающиеся на поверхности основного металла при ударном столкновении с его поверхностью. Для обеспечения прочных межатомных связей между контактирующими частицами, при формировании покрытия, необходим их нагрев и разгон до высоких скоростей.

Методы ГТН характеризуются следующими преимуществами [24]:

- незначительный нагрев напыляемой поверхности;
- высокая производительность;
- получаемые покрытия толщиной от 0,01 до 10 и более мм;
- широкий диапазон состава покрытия.

Для напыления могут быть использованы порошки молибдена, никеля, самофлюсующиеся сплавы и их смеси с порошками карбидов и оксидов с высокой твёрдостью, керамические материалы, включая оксид алюминия и оксид хрома [25, 26]

Существующие технологии ГТН, в зависимости от применяемого источника тепловой энергии, можно разделить на два основных вида: газопламенное напыление, при котором используется теплота, выделяющаяся при сгорании углеводородов, и способы напыления, основанные на использовании теплоты, выделяющейся при горении дуги (дуговая металлизация и плазменное напыление) [25, 26].

Результаты исследований, проведенных М.А. Белоцерковским, М.А. Харламовым и Ю.С. Коробовым [27–29] показали, что с точки зрения технико-экономических показателей предпочтительным является метод дуговой металлизации (ДМ) (таблица 1.2).

При ДМ плавление распрыляемых проволок осуществляется высокоамперной дугой, горящей на ее торцах. Для диспергирования

расплавленного металла используют скоростной поток сжатого газа. Теплота, выделяемая в активных пятнах, практически полностью расходуется на плавление электродной проволоки (60–70 %), а оставшаяся часть теплоты дуги поглощается окружающей средой и потоком транспортирующего газа. Таким образом, эффективный КПД нагрева при ДМ в 7–10 раз больше чем для других способов ГТН, что обуславливает высокую производительность (до 18 кг/ч). Применяемое оборудование ДМ просто в обслуживании, а значит, не требует привлечения высококвалифицированного персонала. Кроме того, используемые при ДМ в качестве материалов проволоки в 2–3 раза дешевле порошков, используемых при других способах напыления. Комбинация преимуществ ДМ в сравнении с другими методами напыления приводит к снижению затрат на получение покрытий в 3–10 раз [30].

Таблица 1.2 – Сравнение показателей эффективности для методов ГТН [27–29]

Метод напыления	Эффективный КПД нагрева, %	Производительность, кг/ч	Относительная стоимость
Газопламенное (ГП)	10	7	3
Газопламенное сверхзвуковое (ГПС)	60	25	5
Плазменное (ПН)	12	5	5
Дуговая металлизация (ДМ)	85	16	1

В качестве материалов при ДМ применяются различные виды проволок. Специализированные марки проволок для напыления, в настоящее время, выпускаются в ограниченном количестве. В основном, для этих целей используются сварочные проволоки по ГОСТ 2246-70 или наплавочные проволоки по ГОСТ 10543-98 (таблица 1.3) [26]. Для получения износостойких покрытий используют сплошные проволоки из сталей мартенситного класса (40X13), высокоуглеродистых (У9, 65Г), легированных (ШХ15) [25]. Однако



твердость таких покрытий снижается, вследствие интенсивного выгорания легирующих элементов, при напылении, в частности углерода.

Применение в качестве распыляемого материала порошковых проволок (ПП) позволяет в значительных пределах варьировать систему легирования получаемых покрытий, путём добавления в шихту необходимых элементов, тем самым, придавая покрытиям те или иные эксплуатационные характеристики [31]. Материал наполнителя порошковой проволоки может быть самым разным [32]. В зависимости от целей того или иного технологического процесса в качестве наполнителя могут использоваться: металлы и их сплавы, редкоземельные металлы, оксиды, бориды, карбиды и т.п.

Таблица 1.3 – Химический состав некоторых проволок для износостойкой наплавки по ГОСТ 10543–98

Марка	Химический состав, %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	Др.
Углеродистая								
Нп-45	0,45	0,5–0,8	0,25	0,25	≥0,30	0,04	0,035	-
Нп-50	0,50	То же						-
Нп-85	0,85	То же						-
Легированная								
Нп-65Г	0,65	0,9–1,2	0,25	0,3	0,3	0,035	0,035	-
Нп-30ХГСА	0,30	0,8–1,1	0,9–1,2	0,8–1,1	0,4	0,025	0,025	-
Нп-40Х2Г2М	0,40	1,8–2,3	0,4–0,7	1,8–2,3	0,4	0,035	0,035	0,8–1,2 Мо
Высоколегированная								
Нп-40Х13	0,40	0,8	0,8	10-13	0,6	0,03	0,03	0,2 Ti
Нп-45Х2В8Г	0,45	1,2	0,5	2,5	0,6	0,03	0,03	8,5 W 0,4 V 0,5 Ti

Большой вклад в разработку и внедрение электродуговых покрытий из ПП внесли специалисты из Физико-механического института им. Г.В. Карпенко НАН Украины [33]. Покрытия из разработанных ПП марки ФМИ системы Fe-Cr-

В-Al широко применяются для восстановления и защиты от абразивного и газоабразивного износа.

Для нанесения износостойких покрытий широкое распространение получили экономнолегированные ПП марки ППМ-6 и 8 системы легирования Fe-C-Cr-Ti-Al разработанные в Уральском институте сварки [34, 35]. Износостойкость покрытий, напыленных данной проволокой, в 1,5–2 раза выше, чем для покрытий из сплошной проволоки феррито-мартенситного класса 20X13, что обуславливается наличием в полученных покрытиях аустенитно-мартенситной матрицы с карбидным упрочнением [34–38].

Основными недостатками дугового напыления являются опасность перегрева и окисления напыляемого материала. Большое количество теплоты, выделяющееся при горении дуги, приводит к значительному выгоранию легирующих элементов, входящих в состав распыляемого материала и насыщению его газами из атмосферы. Кроме того, оборудование ДМ отличается широким углом распыла – до  $70^\circ$ , и низким коэффициентом использования материала – 0,6 [29].

На дистанции напыления частицы, нагретые до высоких температур, активно взаимодействуют с окружающей средой и окисляются [39]. Расплавленные или разогретые до пластичного состояния частицы расплескиваются по поверхности, зацепляясь предварительно по ее неровностям и затем контактируя между собой, при этом образованная оксидная пленка попадает в покрытие. Она оказывает сильное влияние на свойства покрытия: может препятствовать диффузии частиц, влиять на прочность сцепления и твердость покрытия. Вследствие малого размера или низкой скорости отдельные частицы успевают остыть к моменту удара о подложку ниже точки плавления, а их кинетической энергии недостаточно для деформирования. Это приводит к тому, что они остаются в покрытии в глобулярной форме. В интервале между нанесением отдельных слоев на поверхности последнего слоя происходит адсорбция газов и отложение пылевидных фракций распыляемого материала или его оксидов. Кроме того, из-за высокой скорости растекания и кристаллизации

частиц при ударе в зоне контакта с поверхностью ранее нанесенных частиц остаются полости и дефекты. Это приводит к появлению микропустот на стыках частиц, а поскольку покрытие формируется в атмосфере, микропустоты наполняются газом. Часть перегретых выше точки плавления частиц может испаряться и осаждаться в паровой фазе. Таким образом, условия формирования газотермических покрытий обуславливают ряд, свойственных для них, дефектов, к числу которых можно отнести: отслоение или вздутие покрытия вследствие недостаточной адгезии к основному металлу, трещины, пористость и неоднородность структуры [40, 41].

Пористость относится к важнейшим показателям качества покрытий [42]. Высокая пористость негативно отражается на адгезионной и когезионной прочности покрытий, коррозионной и износостойкости, газопроницаемости и др. свойствах. Так, например, в условиях абразивного износа и трения скольжения без смазки наблюдается интенсивная потеря массы покрытия в результате микрорезания и когезионного отрыва [43]. Разрушение протекает вследствие отрыва отдельных частиц и конгломерированных участков покрытия, в зонах покрытия с ослабленной когезионной прочностью между частицами покрытия. Твердые частицы абразива и продуктов изнашивания внедряются в несплошности напыленного покрытия разрушая его по механизму микрорезания [44]. Таким образом, значительную роль в процессе разрушения покрытия играет однородность его структуры, влияющая на шероховатость поверхности трения, поскольку места с резким градиентом свойств являются концентраторами напряжений [45].

В некоторых случаях, например, на деталях узлов трения скольжения со смазкой, пористость может быть полезна, так как она может послужить для накапливания масла. С другой стороны, пористость может вызвать процессы коррозии на границе металл-покрытие [46], когда агрессивные газы или жидкости по открытым порам достигают основного металла. Следовательно, покрытие, работающее без смазки, с абразивными частицами или в агрессивных средах, должно иметь минимальную пористость.

Помимо пористости важную роль в механических свойствах покрытий играет прочность сцепления с основой (адгезия). Недостаточная адгезионная прочность покрытий обуславливается рядом факторов [25, 47]:

- образование прочных связей частиц покрытия с подложкой не по всей поверхности контакта, а только на отдельных участках;
- прочность в пятне приваривания ниже прочности компактного материала, что обуславливается макро- и микроскопической дефектностью образовавшегося соединения;
- недостаточная диффузия покрытия в основной металл вследствие короткого времени их взаимодействия в нагретом состоянии ( $10^{-4}$ – $10^{-7}$  сек);
- большая величина остаточных напряжений, возникающих в напыленном материале, в результате особенностей его формирования.

Если значения внешней нагрузки или остаточных напряжений превысят значения адгезионной прочности покрытия, может произойти его отслоение.

Таким образом, износостойкость газотермических покрытий во многом зависит от их микроструктуры, пористости, когезионной и адгезионной прочности.

С целью снижения недостатков покрытия и технологии ДМ применяется оборудование активированной дуговой металлизации (АДМ), отличие которого заключается в том, что в качестве транспортирующего газа в нем используются продукты сгорания воздушно-пропановой смеси. Сравнение выходных характеристик процессов ДМ и АДМ показали, что окисление капель, угол распыла и пористость были снижены более чем в 2 раза, а коэффициент использования материала и скорость частиц возросли в 1,4 и 3 раза соответственно [29, 30]. Несмотря на значительное улучшение технологических параметров напыления, покрытия получаемые АДМ, обладают адгезией до 45 МПа и пористостью до 3 %. Этого может быть недостаточно для эффективного противостояния покрытия ударно-абразивному износу.

Повышение свойств напыленных покрытий требует модернизации самих методов напыления и оптимизации их режимов, либо применения дополнительных технологических операций [48]. Для уплотнения покрытия и повышения прочности сцепления между слоями и основным металлом могут применяться разные методы: местное оплавление покрытия концентрированными потоками энергии, пластическое деформирование, термомеханическая обработка, окраска специальными лаками, высокотемпературные химические процессы [48, 49] и др.

Пластическое деформирование – это один из методов последующей обработки покрытий, который заключается в обкатке шариком или роликом поверхности покрытия, производимое как в горячем, так и в холодном состоянии. Суть данного метода состоит в пластической деформации поверхностного слоя изделия, под действием обрабатывающего инструмента, вызывающего его уплотнение, заполнение пор и структурные изменения в кристаллической решетке, повышающие износостойкость и создающие остаточные сжимающие напряжения, повышающие сопротивление усталости [50].

Недостатком обработки покрытий путем поверхностной обкатки является невозможность получения высокой плотности покрытия, вероятность его растрескивания при холодной деформации, и отсутствие повышения адгезионной прочности [51].

С целью повышения плотности покрытия производится также обработка герметиками. Пропитка газотермических покрытий производится окунанием, распылением или наносится кистью. Цель уплотнительного пропитывания герметиками состоит в закрытии или заполнении всех открытых структурных дефектов, связанных с поверхностью покрытия [49, 52–55].

Однако, неправильный выбор герметика может не принести желаемого результата, а в некоторых случаях, даже ускорить разрушение покрытия при эксплуатации [48].

С целью последующей модификации покрытия может быть использована электромеханическая обработка (ЭМО) реализуемая при пропускании электрического тока большой плотности ( $10^8$ – $10^9$  А/м<sup>2</sup>) и низкого напряжения (2–6 В) через зону контакта детали и деформирующего ролика. В результате выделения большого количества теплоты в зоне контакта, происходит высокоскоростной нагрев локального микрообъема поверхности с одновременным пластическим деформированием. Вследствие быстрого охлаждения нагреваемых участков поверхностного слоя за счет отвода тепла вглубь основного металла происходит мгновенная закалка поверхности [56]. К недостаткам способа можно отнести невозможность повышения адгезии, низкую производительность и высокую стоимость оборудования [51].

Проведённые исследования показывают, что сопутствующая объёмная и газопламенная термообработка газотермических покрытий позволяет существенно изменять структуру нанесённых покрытий, снижая пористость и повышая их твёрдость и прочность сцепления с основой. Термообработка улучшает коррозионную стойкость системы основа-покрытие, за счёт снижения количества неоднородностей напылённого покрытия, таких как пористость и микротрещины между слоями, которые служат путями для проникновения коррозионной среды к основе [57].

Однако, несмотря на значительное улучшение характеристик покрытия, объёмная и газопламенная термообработка имеют ряд недостатков. Сильное тепловое воздействие на основу при нагреве в печи приводит к её разупрочнению, термическим деформациям и большим затратам энергии [58]. Качество газопламенной термообработки во многом зависит от опыта оператора. Поэтому поиск более эффективных методов обработки напылённых покрытий является актуальной научно-технической задачей.

Основной отличительной особенностью методов поверхностного упрочнения высококонцентрированными источниками нагрева является возможность получения скоростей нагрева и охлаждения материалов, на несколько порядков превышающих значения, характерные для традиционных

методов упрочнения (печной закалки, закалки ТВЧ, газопламенной закалки и др.), что способствует получению упрочненных слоев с недостижимым ранее уровнем эксплуатационных свойств.

Высококонцентрированные источники энергии (лазерный и электронный лучи) обладают значительной степенью локализации теплового воздействия на подложку и обеспечивают высокие скорости кристаллизации расплавленного металла. Однако низкий коэффициент преобразования энергии луча в тепловую, сложность и малая производительность процесса требуют более глубокого изучения возможностей электронно-лучевой обработки. Поэтому для обработки напылённых покрытий, наибольшее распространение в настоящее время получили методы лазерной обработки [46, 58–63].

Во время лазерной обработки энергетическая эффективность переноса энергии от сфокусированного луча к материалу, прежде всего, зависит от оптических и теплофизических свойств обрабатываемого материала. Другие факторы, которые также определяют эффективность лазерной обработки, так называемые параметры лазерного луча, включают: интенсивность лазерного излучения, распределение энергии луча, а также продолжительность работы. Энергия фотонов лазерного луча поглощается свободными носителями в зоне проводимости металлической матрицы. Кинетическая энергия электронов, возникшая в результате взаимодействия с фотоном, передаётся кристаллической решётке, вызывая увеличение её внутренней энергии.

Под воздействием лазерной обработки происходит оплавление покрытия, что приводит к снижению пористости [46, 59].

Для увеличения прочности сцепления покрытия с подложкой при лазерной обработке температура границы «покрытие – основа» должна достигать температуры плавления подложки. В случае упрочнения материала покрытия температура его поверхности доводится до температуры плавления, а температура границы при этом не должна достигать температуры плавления подложки [60].

Таким образом, использование лазеров для сопутствующей обработки напылённых покрытий может быть решением многих проблем: увеличения адгезии, создания коррозионно- и износостойких слоёв на поверхности покрытий, снижения газопроницаемости путём заплавления поверхностной пористости. Однако до сих пор широкое внедрение лазерных процессов в производство сдерживается [64]. Основные причины этого – высокая стоимость оборудования и эксплуатационных затрат, отсутствие высококвалифицированных рабочих, способных обслуживать технологические комплексы, низкая надёжность технологических комплексов при эксплуатации, использование только для крупносерийных производств, невозможность работы в полевых условиях.

В отличие от перечисленных выше процессов, технология и оборудование для плазменной поверхностной обработки отличается простотой в эксплуатации, низкой стоимостью, высокой производительностью, успешно развивается в последние годы и находит всё большее применение в разных отраслях промышленности. Плазменные источники нагрева обладают следующими преимуществами [65, 66]:

- высокая стабильность и устойчивость сжатой дуги;
- высокий эффективный КПД нагрева (80 %)
- мощность ( $10^2$ – $10^5$  Вт) и плотность мощности ( $5 \cdot 10^2$ – $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>) сопоставимая с электронным и лазерным лучами;
- гибкость регулирования технологических характеристик.

Несмотря на все преимущества плазменного источника нагрева над другими высококонцентрированными источниками, их использование для последующей обработки газотермических покрытий исследовано только для самофлюсующихся сплавов на основе Ni, так как они обладают низкой температурой плавления (1420 °С), что облегчает их последующее оплавление, при слабом тепловом воздействии на основу [58, 67–70]. Однако такие сплавы обладают высокой стоимостью, в связи с чем актуальными становятся задачи



разработки технологии и исследования процессов плазменного последующего оплавления покрытий, полученных методом дуговой металлизации из экономнолегированных сплавов, температура плавления которых соответствует металлам группы железа, порядка 1800 К.

Неоднородности структуры и химического состава газотермических покрытий обуславливают значительное изменение теплофизических характеристик покрытия, что затрудняет теплообмен с подложкой. Высокий градиент температур на границе покрытие – подложка может привести отслоению покрытия. По данным [60], для повышения прочности сцепления покрытия с основой, необходимо обеспечить оплавление его поверхности. Таким образом, необходимо знать положение фронта плавления в композиции, в зависимости от параметров режима плазменной обработки. Рациональным методом определения параметров режима, в данном случае, является построение математической модели распределения температур в композиционном материале от воздействия концентрированного источника нагрева.

### **1.3. Математическое моделирование как инструмент совершенствования технологии оплавления износостойких металлизационных покрытий**

Характер термического цикла обуславливает особенности структур и свойств материала, формирующихся в результате поверхностной обработки. Информация о температурных полях, сформированных в материале под действием источника нагрева позволяет прогнозировать геометрические параметры зоны обработки, характер и степень завершенности фазовых превращений, а также структуру и свойства упрочненного слоя. Таким образом, с целью подбора рациональных режимов плазменной обработки газотермического покрытия необходимо знать распределение температуры в покрытии и подложке в процессе нагрева и охлаждения.

Экспериментальное определение температур в процессе скоростного нагрева сопряжено с большими трудностями (инерционность аппаратуры, малая толщина покрытия, высокие температуры и др.). Поэтому расчетное определение температур в композиционном материале под воздействием плазменного источника нагрева имеет большое практическое и теоретическое значение.

Математическое моделирование температурных процессов, происходящих в изделии под воздействием сварочных источников нагрева, сводится к решению дифференциального уравнения теплопроводности, в общем случае трехмерного тела, в декартовой системе координат, имеющее вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q(x, y, z, t), \quad (1.1)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность,  $\lambda$  – теплопроводность,  $q(x, y, z, t)$  – мощность внутренних источников теплоты.

Эффективная тепловая мощность сварочного источника теплоты, т. е. количество теплоты, полученное изделием, определяется по формуле:

$$q = \eta IU, \quad (1.2)$$

где  $I$  – сварочный ток;  $U$  – напряжение на дуге;  $\eta$  – эффективный КПД процесса нагрева.

Любой источник теплоты характеризуется прежде всего тепловой мощностью и законом распределения этой мощности по поверхности пятна нагрева. Для приближенного описания изменения плотности теплового потока по радиусу пятна нагрева Н.Н. Рыкалиным [71] было предложено использование закона нормального распределения:

$$q_2 = q_m e^{-kr^2}, \quad (1.3)$$

где  $q_m = kq/\pi$  – наибольший тепловой поток в центре пятна нагрева;  $k$  – коэффициент сосредоточенности теплового источника;  $r$  – расстояние от рассматриваемой точки до оси.

Чтобы конкретизировать это выражение применительно к тем или иным условиям обработки, необходимо располагать сведениями о величинах  $q$  и  $k$ . Первая из них характеризует плотность теплового потока в центре пятна ( $r = 0$ ). Вторая дает представление об остроте кривой нормального распределения, т.е. о степени концентрации теплоты вблизи центра пятна нагрева и плотности мощности (таблица 1.4). Значения коэффициента сосредоточенности определяются опытным путем.

Таблица 1.4 – Основные характеристики источников нагрева [65]

Источник нагрева	Мощность, Вт		Плотность мощности, Вт/см <sup>2</sup>	
	min	max	min	max
Газовое пламя	10 <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup>	2·10 <sup>2</sup>	6·10 <sup>2</sup>
Электрическая дуга	50	2·10 <sup>5</sup>	5·10 <sup>2</sup>	4·10 <sup>4</sup>
Сжатая (плазменная) дуга	10 <sup>2</sup>	10 <sup>5</sup>	5·10 <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup>
Плазменная струя	10 <sup>3</sup>	10 <sup>5</sup>	5·10 <sup>2</sup>	10 <sup>5</sup>
Луч:				
ионный	10	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>5</sup>
электронный	10	10 <sup>5</sup>	5·10 <sup>2</sup>	10 <sup>7</sup>
лазерный	10	2,5·10 <sup>4</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>10</sup>
Солнечные нагреватели	10 <sup>2</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>2</sup>	2·10 <sup>3</sup>

Для решения дифференциальных уравнений требуются дополнительные условия. Если искомая функция (концентрация, температура и т.д.) является функцией времени  $u = f(t)$ , то требуются начальные условия, характеризующие значение этой функции в момент времени, принятый за начальный [72]:

$$T(t = 0) = T_0, \quad (1.4)$$

Если искомая функция также является функцией пространственных координат  $u = f(t, x)$ , то начальные условия характеризуют её распределение в пространстве в начальный момент времени:

$$T(x, y, z, 0) = T(x, y, z), \quad (1.5)$$

В последнем случае помимо начальных условий, требуются ещё и граничные условия, характеризующие значение функции на границе изучаемой системы с внешней средой для любого момента времени [72–74].

– условие 1-го рода:

$$T_s = T_s(x, y, z, t), \quad (1.6)$$

– условие 2-го рода:

$$q_s = q_s(x, y, z, t), \quad (1.7)$$

– условие 3-го рода:

$$q_s = \alpha(T_s - T_0), \quad (1.8)$$

– условие 4-го рода. Ставится на границе двух сред с различными коэффициентами теплопроводности ( $\lambda_1 \neq \lambda_2$ ) и равными температурами. Данное условие описывает идеальный тепловой контакт между двумя слоями [73, 74]:

$$\begin{cases} T_1(x, t) = T_2(x, t) \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \end{cases}, \quad (1.9)$$

Дифференциальные уравнения теплопроводности решаются двумя основными методами: аналитическими и численными. Аналитические методы позволяют получить решение только для линейных задач, т.е. для тех случаев, когда теплофизические свойства материалов не зависят от температуры. К основным аналитическим методам можно отнести метод разделения переменных (метод Фурье), метод источников и стоков, метод интегральных преобразований и метод функции Грина.

Решение нелинейных задач, когда необходимо учесть влияние температуры на теплофизические свойства стали, производится численными методами, такими как: метод конечных разностей и метод конечных элементов. Решение дифференциального уравнения численными методами сводится к решению системы алгебраических уравнений [75].

У каждого из методов есть свои преимущества и недостатки. У аналитических методов можно отметить следующие преимущества [75]:

– аналитические решения более информативны чем численные;

- всегда позволяют вычислять значения решения в одной точке, не прибегая к вычислению значений решений в других точках, как это бывает при решении задач разностными методами;
- позволяют определить решение в любой точке, а не только в узлах сетки;
- расчеты по аналитическим моделям, особенно трехмерным, занимают значительно меньше машинного времени, чем численные;
- наиболее важным преимуществом аналитических методов решения является возможность проследить влияние физических параметров, начальных и граничных условий на характер решения.

Главное преимущество численных решений состоит в том, что их можно получить даже в том случае, если аналитическое получить невозможно. Большинство нелинейных уравнений с частными производными необходимо решать численными методами. Однако это не снижает интерес к аналитическим методам, особенно когда решение можно получить быстрее и точнее, чем численное [75].

Так как температурные зависимости теплофизических характеристик, напыляемых материалов не известны, возможно аналитическое решение дифференциального уравнения теплопроводности. В данной работе предлагается решение уравнения теплопроводности методом функции Грина, получившего широкое распространение для описания сварочных процессов. Этот метод весьма универсальный: его можно применять для решения краевых задач при достаточно общей постановке в одно-, двух и трехмерных случаях, в ограниченных, полуограниченных и неограниченных областях, при неоднородных начальных, граничных условиях и для неоднородных уравнений, причем как для нестационарной, так и для стационарной теплопроводности [75].

Значительные исследования в применении данного метода для решения задач теплопроводности представлены в работах В.В. Власова [76], В.М. Язовских [75, 77] и А.Д. Полянина [78]. А.Д. Поляниным представлены решения

более чем 2000 различных задач математической физики методом функции Грина. Применение данного метода к сварочным процессам рассмотрено в работах В.М. Язовских [75,77].

Решение краевой задачи теплопроводности сводится к определению температуры в точке с координатами  $x, y, z$  в момент времени  $\tau$ , обусловленную действием мгновенного точечного источника единичной мощности, помещенного в точку  $P(x', y', z')$  в момент времени  $\tau$ . Решение состоит в том, что предварительно находят специальное решение задачи того же типа (функцию Грина) и через него получают интегральное представление решения исходной задачи [75].

Решением, соответствующим мгновенному точечному источнику теплоты мощностью  $q = c\rho$  в бесконечном теле, является решение уравнения теплопроводности

$$G(x, x', y, y', z, z', t) = \frac{1}{(2\sqrt{\pi at})^3} \exp\left(-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4at}\right), \quad (1.10)$$

Полученная функция обладает всеми свойствами  $\delta$ -функции Дирака. Во-первых, эта функция при  $t \rightarrow 0$  в точке  $(x = x', y = y', z = z')$  стремится к бесконечности, а в точке  $(x \neq x', y \neq y', z \neq z')$  – к нулю. Во-вторых, интеграл от функции в неограниченном пространстве должен быть равен 1. Эти свойства функции Грина позволяют применять ее для решения дифференциальных уравнений теплопроводности.

Следует отметить, что существует достаточно большое число исследований моделирования теплофизических процессов, происходящих в твердых телах под воздействием плазменных и других высокоэнергетических источников нагрева [71, 79, 80]. Однако, в большинстве проведенных по данному направлению работ, мощность сжатой дуги или плазменной струи определяется произведением напряжения на силу тока, то есть не учитывается влияние характерных параметров режима плазменной обработки – расхода плазмообразующего газа, диаметра плазмообразующего сопла и расстояния от плазмотрона до изделия [79, 80].

В работах Б.О. Христофиса [81] установлено влияние параметров режима плазменной закалки по мере ослабления их влияния на: эффективную мощность сжатой дуги – ток сжатой дуги, диаметр плазмообразующего сопла, расход плазмообразующего газа и расстояние между соплом и изделием; напряжение сжатой дуги – диаметр сопла, ток сжатой дуги, расстояние от среза сопла плазмотрона до изделия и расход плазмообразующего газа. Однако наибольшее влияние на степень упрочнения оказывают скорость обработки и сила тока, так как они позволяют регулировать скорости нагрева и охлаждения [81].

Повышение силы тока приводит к увеличению ширины и глубины упрочненной зоны, что связано с увеличением эффективной тепловой мощности сжатой дуги [81].

Увеличение скорости плазменной обработки приводит к снижению толщины и глубины зоны упрочнения, что связано с уменьшением погонной энергии.

Повышение расхода плазмообразующего газа увеличивает степень обжатия дуги, температуру и проплавляющую способность, а, значит, и эффективную тепловую мощность плазменной струи, что приводит к увеличению геометрических параметров зоны обработки [82, 83].

Увеличение диаметра сопла плазмотрона снижает эффективную тепловую мощность сжатой дуги, так как снижается плотность энергии в канале сопла плазмотрона, что приводит к снижению ширины и глубины упрочненной зоны [82].

Увеличение расстояния от сопла до изделия приводит к росту падения напряжения на участке электрод – сопло, что приводит к увеличению тепловложения в изделие, а, значит, и к увеличению геометрических параметров упрочненной зоны. Однако, с ростом расстояния от сопла до изделия возрастают потери теплоты в окружающую среду, поэтому, эффективный КПД падает [82].

Таким образом, учет этих параметров в процессе моделирования поможет шире оценить влияние параметров плазменной обработки на распределение

температур в композиционном материале «покрытие – основа», и подобрать необходимые режимы обработки.

В работе [84] путем аппроксимации экспериментальных данных была получена зависимость коэффициента сосредоточенности от параметров аргоновой плазмы:

$$k = 875 \frac{G_0^{0.2}(1 + 0.06l)}{I^{0.64}h^{0.46}d_c^{0.26}}, \quad (1.11)$$

где  $G_0$  – расход газа, г/с;  $I$  – сила тока дуги, А;  $l$  и  $d_c$  – размеры канала сопла, мм;  $h$  – расстояние от среза сопла до нагреваемой поверхности, мм.

Формула справедлива в области значений:  $G_0 = 0,2-0,5$ ;  $I = 100-400$ ;  $l = 4,5-8$ ;  $d_c = 4-8$ ;  $h = 5-30$ .

Коэффициент сосредоточенности теплового потока наиболее сильно зависит от диаметра сопла  $d_c$ , резко возрастая с уменьшением его диаметра. С увеличением расхода плазмообразующего газа вначале (при  $G = 0,5-3$  м<sup>3</sup>/ч) коэффициент  $k$  возрастает, а затем (при  $G = 3-6$  м<sup>3</sup>/ч) снижается [85,86].

Помимо этого, большинство выполненных моделей сосредоточено на рассмотрении широко распространённых конструкционных материалов и почти не встречаются работы, направленные на моделирование процессов теплопереноса под воздействием плазменной дуги на композиционных материалах, таких как газотермические покрытия. В проведенных по данному направлению работах учитывается зависимость теплофизических характеристик покрытия от его пористости, однако в качестве основы покрытия выбраны материалы с известными теплофизическими характеристиками [60, 87].

Образовавшаяся в результате напыления пористость оказывает влияние на теплофизические характеристики покрытия. Таким образом плотность покрытия зависит не только от плотности напыленного материала, но и от плотности газа, наполняющего его поры.

Теплопроводность покрытия определяется не только химическим составом, а также структурой и толщиной покрытия. Перенос тепла в покрытии



определяется их слоистым строением, большим количеством пор, трещин, а также границ раздела между частицами и осуществляется [50]:

1. электронами по телу самих металлических частиц, составляющих покрытие, а также на участках приваривания, поскольку здесь образовались прочные металлические связи между частицами ( $\lambda_e$ );
2. за счёт решёточной и фоновой теплопроводности в частицах и по участкам приваривания между частицами ( $\lambda_\phi$ ) для неметаллических покрытий;
3. теплопроводностью газа, заключенного в порах покрытия ( $\lambda_r$ );
4. лучистым теплообменом в порах в случаях нагрева покрытия до высокой температуры ( $\lambda_l$ ).

Поскольку границы раздела между частицами не полностью заполнены участками или очагами схватывания, а передача тепла по механизмам 3 и 4 происходит медленно, суммарный коэффициент теплопроводности покрытия составит:  $\lambda = \lambda_e + \lambda_\phi + \lambda_l$  и он значительно ниже чем у сплошных материалов. По мере увеличения температуры изменяется вклад от этих механизмов в теплопроводность покрытия и поэтому её зависимость от температуры имеет сложный характер и сильно отличается от аналогичной зависимости для сплошных материалов.

А.Ф. Пузряков, в своих расчетах, для определения эффективных теплофизических характеристик газотермического покрытия с учетом пористости использовал следующие уравнения [88]:

$$c\rho = c\rho_m(1 - P) + c\rho_v P, \quad (1.12)$$

$$\lambda = \lambda_m(1 - P) + \lambda_v P, \quad (1.13)$$

где  $P$  – пористость покрытия;  $\lambda_m, \lambda_v$  – теплопроводность материала покрытия и воздуха, находящегося в порах, соответственно;  $c_m\rho_v, c_m\rho_v$  – объемная теплоёмкость материала покрытия и воздуха, соответственно.

Однако представленная формула для определения эффективной теплопроводности действительна в случае, когда плоские, чередующиеся друг за другом слои твердой матрицы и газа расположены параллельно направлению

теплового потока [89]. Поэтому многие исследователи используют уравнение Лихтенекера [86, 88, 89]:

$$\lambda = \lambda_M^{1-P} \lambda_B^P, \quad (1.14)$$

По данным исследований, проведённых Кудиновым на покрытиях и сплошных материалах из W, Mo и оксидов Al и Zr видно, что теплопроводность покрытий во много раз ниже теплопроводности компактных материалов при комнатной температуре [50]. Кроме того, в покрытиях с ростом температуры их теплопроводность несколько возрастает или остаётся приблизительно постоянной, а у компактных материалов она уменьшается.

В работах Кречмара Э. [91] представлены результаты испытаний покрытий и литых металлов (медь, латунь, оловянистая бронза Sn7, алюминий, сталь (0,12 % C)), которые показывают, что теплопроводность покрытий примерно в 2 раза ниже, чем у литого материала.

В институте проблем материаловедения им. Францевича НАН Украины была разработана методика определения теплопроводности газотермических покрытий [92]. Полученные по их методике данные показывают, что теплопроводность медного покрытия, напыленного методом дуговой металлизации на подложку из нержавеющей стали, в 10 раз меньше теплопроводности чистой меди. Очевидно, это связано с формированием окисных пленок в межламельных границах. Однако, при повторном нагреве средняя теплопроводность покрытия повышается примерно в 2 раза. Очевидно, это вызвано частичным спеканием частиц меди после первого нагрева.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что помимо пористости, на общую теплопроводность покрытий большое влияние оказывают окисные прослойки, влияние которых не учитывается рассмотренных ранее зависимостях.

Для большинства существующих марок сталей значения теплофизических характеристик известны и сведены в справочники. Однако характеристики новых материалов для нанесения износостойких покрытий неизвестны.

Следовательно, для дальнейших расчетов теплофизических параметров необходимо определить их для металлической основы наносимого покрытия.

Так в работе [93] производился расчет характеристик различных материалов в зависимости от процентного содержания легирующих элементов по следующим выражениям:

$$\lambda = \frac{1}{20} (11 - 7\sqrt[4]{\sigma}); \quad c\rho = \frac{1}{10} (55 - 9\sqrt[4]{\sigma}), \quad (1.15)$$

где  $\sigma$  – коэффициент зависящий от содержания легирующих элементов

$$\sigma = \frac{1}{4} \left( \begin{array}{l} \frac{1}{3} \left( C + \frac{1}{5} \left( Ni + Co + Cu + \frac{W}{3} \right) \right) + \\ + \frac{Mn}{14} + \frac{Si + Al}{7} + \frac{Cr + V + Ti}{13} + \frac{Mo + Nb + Zr}{24} \end{array} \right), \quad (1.16)$$

Максимальная ошибка при сравнении результатов расчета, по данной зависимости, с табличными значениями теплофизических характеристик материала составляет 10 %.

При проведении термической обработки газотермического покрытия наибольший интерес представляет знание температуры поверхности покрытия и границы «покрытие – подложка» в процессе нагрева и охлаждения, необходимых для оценки величины термических напряжений. Опасность разрушения покрытия из-за термических напряжений должна учитываться при выборе режима нагрева.

Таким образом, при определении параметров режима плазменной обработки газотермического покрытия, в модели должны быть учтены характерные параметры плазменной обработки, а также значения теплофизических характеристик покрытия в зависимости от его пористости и наличия оксидных прослоек.

#### 1.4. Выводы по главе

1. С целью продления срока службы деталей, подверженных интенсивному абразивному износу, по критерию технологичности предпочтительно применение дуговой металлизации, с использованием в качестве напыляемого материала экономнолегированных порошковых проволок системы Fe-C-Cr-Ti-Al. Однако, наличие пор и слоистой структуры покрытий приводит к снижению их абразивной износостойкости, а достаточно низкая адгезия покрытия в условиях эксплуатации может привести к отслоению.

2. Для повышения физико-механических свойств покрытий применяют их последующую обработку. Показано, что наиболее эффективной для повышения износостойкости является оплавление высококонцентрированными источниками нагрева, наиболее дешевым и технологичным среди которых является плазменная дуга. Однако, такая обработка металлизационных покрытий на основе железа сдерживается вследствие отсутствия технологических рекомендаций применительно к обработке материалов с низкой теплопроводностью и высокой температурой плавления.

3. Выбор необходимых параметров режима плазменного оплавления покрытий на основе железа, нанесенных методом дуговой металлизации, целесообразно выполнить на основе моделирования распространения тепла в биметаллическом композиционном материале. Применительно к данной задаче, решение необходимого в модели дифференциального уравнения теплопроводности предпочтительно выполнить методом функции Грина.

4. Рабочие органы почвообрабатывающих машин, такие как лемеха плугов, соответствуют условиям интенсивного абразивного износа и характеризуются высокой ежегодной потребностью в них колхозов, следовательно, их удобно применить в качестве объекта практических исследований.

Целью работы является изучение влияния плазменного оплавления на изменение абразивной износостойкости покрытий системы Fe-C-Cr-Ti-Al, полученных дуговой металлизацией.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Разработать математическую модель тепловых процессов в композиции «покрытие – основа» от воздействия плазменного источника нагрева с целью подбора параметров режима обработки и выполнить ее валидацию.

2. Определить закономерности влияния плазменной обработки на характеристики структуры и их связь с физико-механическими и служебными свойствами покрытий системы Fe-C-Cr-Ti-Al.

3. На основе полученных данных разработать технологию плазменного оплавления металлизационных покрытий на основе железа для повышения их абразивной износостойкости применительно к рабочим органам почвообрабатывающих машин и провести их оценку в сравнении с альтернативами.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОМПОЗИЦИИ «ПОКРЫТИЕ – ОСНОВА» ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СЖАТОЙ ДУГИ

Для подбора параметров режима обработки и прогнозирования абразивной износостойкости, за счет изменения структуры покрытия, построили математическую модель плазменного оплавления двухслойного материала, путем решения краевой задачи теплопроводности методом функции Грина. Этапы построения модели включают: аналитическое решение уравнения теплопроводности через функцию Грина, анализ влияния параметров режима плазменной обработки на геометрию зоны оплавления и оценка структурного состояния покрытия для определения материала обладающего большей стойкостью к абразивному износу.

### 2.1. Разработка математической модели

При разработке модели учитывали:

- кондуктивный перенос тепловой энергии в материалах композиции;
- теплоотдачу с поверхности покрытия;
- энтальпии плавления и парообразования материалов;
- теплофизические характеристики материалов покрытия и основы;
- подвижность теплового источника;
- зависимость коэффициента сосредоточенности от параметров режима обработки.

При моделировании не учтены следующие показатели:

- зависимость напряжения на дуге от параметров режима обработки;
- зависимость теплофизических характеристик материалов от температуры;
- поглощение или выделение теплоты фазовых превращений;
- течение жидкости в расплавленной ванне;

– влияние краевых эффектов.

Для построения математической модели определяли расчетную схему процесса плазменного оплавления композиционного материала «металлизационное покрытие – основа». Для постановки задачи ввели прямоугольную систему координат (рисунок 2.1).

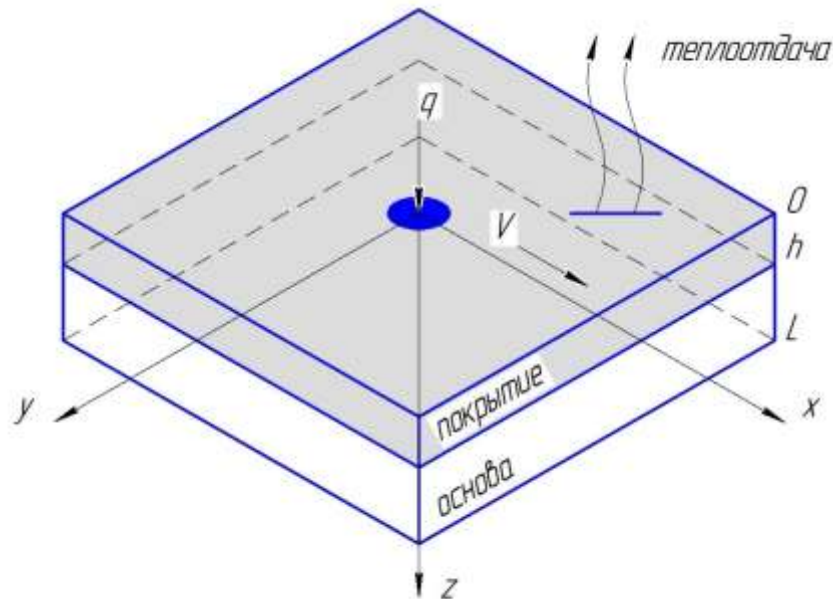


Рисунок 2.1 – Расчетная схема

Интегральное решение уравнения теплопроводности методом функции Грина имеет следующий вид:

$$T(x, y, z, \tau) = \frac{1}{c\rho} \int_{\tau} \int_x \int_y \int_z G(x, x', y, y', z, z', \tau) P(x', y', z', \tau) dx' dy' dz' d\tau, \quad (2.1)$$

где  $G(x, x', y, y', z, z', \tau)$  – функция Грина;  $P(x, y, z)$  – функция источника.

Для получения окончательного решения исходной задачи необходимо в первую очередь определиться с функцией источника. Металлизационное покрытие обладает толщиной 1–2 мм, а в зоне контакта с основным металлом, имеющим высокую теплопроводность, будет происходить интенсивный теплоотвод от покрытия, что приведет к неравномерному распределению температур по толщине покрытия. Это позволяет описать плазменный нагрева

функцией подвижного непрерывно действующего точечного источника нагрева [74]:

$$P(x', y', z', \tau) = \frac{q}{c\rho} \delta(x)\delta(y)\delta(z)E(\tau), \quad (2.2)$$

где  $E(\tau)$  – единичная функция

$$E(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq \tau \leq t \\ 0 & \text{при } \tau > t \end{cases}, \quad (2.3)$$

Таким образом  $E(\tau)$  – это разрывная функция, испытывающая скачок при  $\tau = 0$ . Такая функция получается при внезапном подключении какого-либо постоянного воздействия, в данном случае источника тепла.

В процессе плазменного оплавления на возможность теплоотвода в его нижние слои будет сильно влиять толщина изделия. Для учета этого будем рассматривать распространение тепла в плоском слое:

$$-\infty \leq x \leq \infty; -\infty \leq y \leq \infty; 0 \leq z \leq L, \quad (2.4)$$

Давление сжатой дуги и потоки плазмообразующего и защитного газов обуславливают конвективный теплообмен с окружающей средой. Следовательно, на поверхности покрытия ( $z = 0$ ) зададим граничные условия III рода, тогда уравнение теплопроводности примет следующий вид [74]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + P(x, y, z, t) + bT(x, y, z, t), \quad (2.5)$$

где  $bT(x, y, z, t)$  – количество тепла, отдаваемое единицей объема в единицу времени в окружающую среду;  $b$  – коэффициент теплоотдачи,  $1/с$ .

$$b = \frac{2\alpha}{c\rho L},$$

где  $L$  – толщина пластины;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, в общем случае он отражает совместное действие ( $\alpha_k$ ) конвекции и излучения ( $\alpha_p$ ):  $\alpha = \alpha_k + \alpha_p$ .

Будем считать, что обрабатываемая пластина с покрытием лежит на поверхности, плохо проводящей тепло, т.е. тепловой поток в ограждающую конструкцию равен нулю (адиабатная граница), а, значит, нижнюю границу ( $z = L$ ) зададим граничными условиями II рода:



$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = 0, \quad (2.6)$$

В реальных условиях тепловые процессы на поверхности раздела покрытия с основой характеризуется сложным взаимодействием обусловленным рельефом, полученным после предварительной дробеструйной обработки поверхности подложки, а также наличием на ней оксидных прослоек. Вследствие отсутствия данных по тепловому взаимодействию металлизационного покрытия с основой, композицию будем считать пластиной с переменными по толщине теплофизическими свойствами. Следовательно, математическая постановка задачи имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right), 0 < z < h \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right), h < z < L \end{cases}, \quad (2.7)$$

где  $a = \lambda / c\rho$  – коэффициент температуропроводности ( $\text{м}^2/\text{с}$ ).

Такая постановка задачи аналогична граничным условиям IV рода, описывающим идеальный тепловой контакт на границе двух поверхностей.

Для расчета теплопроводности материала покрытия с учетом влияния оксидных прослоек воспользуемся формулой, для расчета эффективной теплопроводности влажных пористых материалов, адаптированной под условия данной задачи [90]:

$$\lambda = \lambda_M^{1-P-V} \lambda_B^P \lambda_O^V, \quad (2.8)$$

где  $\lambda_M$ ,  $\lambda_B$ ,  $\lambda_O$  – теплопроводности металла, воздуха и оксидных прослоек в покрытии соответственно,  $\text{Вт}/\text{м}\cdot^\circ\text{C}$ ;  $P$  – пористость, %;  $V$  – доля оксидных прослоек в покрытии, мас. %.

Будем считать, что доля оксидов в покрытии  $V$  равно массовой доле шлака, образующейся на поверхности капли на дистанции напыления. В соответствии с работой В.Н. Бороненкова и Ю.С. Коробова [30], при дуговой металлизации сварочной проволоки Св08Г2С, для наиболее вероятной доли поверхности капли свободной от шлака (0,45), массовая доля шлака составляет от 5 до 12 % и

увеличивается с ростом парциального давления кислорода и уменьшением диаметра частиц. В процессе напыления рассматриваемой порошковой проволоки системы Fe-C-Cr-Ti-Al на поверхности капли образуются следующие оксиды [30]: FeO; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; TiO<sub>2</sub>; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Теплофизические свойства оксидов в шлаке  $X_{\Sigma O}$  (где  $X - \lambda, c, \rho$ ) определим произведением характеристики  $i$ -того оксида типа MeO на его долю участия в шлаке:

$$X_{\Sigma O} = \sum_i (X_{MeO} \cdot V_{MeO})_i \quad (2.9)$$

Расчет теплоемкости и плотности покрытия проведем по аддитивным зависимостям:

$$\rho = \rho_M \cdot (1 - P - V) + \rho_B \cdot P + \rho_O \cdot V, \quad (2.10)$$

$$c = c_M \cdot (1 - P - V) + c_B \cdot P + c_O \cdot V, \quad (2.11)$$

Расчет теплофизических характеристик металла покрытия из распыляемых проволок выполним по формулам (1.15, 1.16) в зависимости от массовой доли легирующих элементов в покрытии.

Температура в начальный момент времени равна нулю:

$$T(x, y, z, 0) = 0, \quad (2.12)$$

Окончательное трехмерное уравнение теплопроводности в подвижной системе координат, перемещающейся вдоль положительного направления оси  $x$  с постоянной скоростью  $V$ , записали следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + V \frac{\partial T}{\partial x} + P(x, y, z, t) - bT(x, y, z, t), \quad (2.13)$$

Функция Грина для рассматриваемой схемы нагреваемого тела, граничных условий и типа источника нагрева имеет следующий вид [73]:

$$G(x, x', y, y', z, z', \tau) = \frac{\exp(-b\tau)}{(2\sqrt{\pi a \tau})^3} \exp\left(\frac{(x - x' - V\tau)^2 + (y - y')^2}{4a\tau}\right) \times \\ \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \exp\left(\frac{(z - z' + 2nL)^2}{4a\tau}\right) + \exp\left(-\frac{(z - z' + 2nL)^2}{4a\tau}\right) \right\}, \quad (2.14)$$

Таким образом, учитывая все вышесказанное, общее выражение для решения по методу функции Грина можно описать выражением:

$$T(x, y, z, \tau) = \frac{q}{c\rho(2\sqrt{\pi a})^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^L \int_0^t \frac{1}{(\sqrt{\tau})^3} \exp\left(\frac{(x-x'-Vt)^2 + (y-y')^2}{4at}\right) \times \\ \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \exp\left(\frac{(z-z'+2nL)^2}{4at}\right) + \exp\left(-\frac{(z-z'+2nL)^2}{4at}\right) \right\} \times \frac{\exp(-bt)}{\sqrt{\tau}} \\ \times \delta(x)\delta(y)\delta(z)E(\tau)\partial x'\partial y'\partial z'\partial\tau, \quad (2.15)$$

Используя для решения уравнения (2.15) свойства  $\delta$ -функции и единичной функции получим:

$$T(x, y, z, \tau) = \\ \frac{q}{8c\rho(\sqrt{\pi a})^3} \int_0^t \frac{1}{(\sqrt{\tau+t_0})^3} \exp\left(\frac{(x-V(\tau+t_0))^2 + (y)^2}{4a(\tau+t_0)} - b(\tau+t_0)\right) \times \\ \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \exp\left(\frac{(z+2nL)^2}{4a(\tau+t_0)}\right) + \exp\left(-\frac{(z+2nL)^2}{4a(\tau+t_0)}\right) \right\}, \quad (2.16)$$

где  $t_0 = 1/4ak$  – длительность распространения фиктивного источника [75, 94];  $k$  – коэффициент сосредоточенности плазменного источника нагрева определим по зависимости (1.11).

Учет влияния энтальпии плавления и парообразования на распределение температур произведен, путем сравнения удельной теплоты, введенной в изделие, со значениями удельной теплоты плавления и парообразования. В случае, когда суммарная введенная теплота меньше энтальпии плавления/парообразования, температура  $T(x, y, z)$  остается неизменной, а когда теплота превышает значение энтальпии, расчет температуры продолжается по полученной зависимости (2.16) Расчёт введенной в изделие теплоты производился по зависимости от удельной теплоемкости:

$$q_i = c(T - T_0), \quad (2.17)$$

На рисунке 2.2 представлен алгоритм учета в модели энтальпии плавления и парообразования.

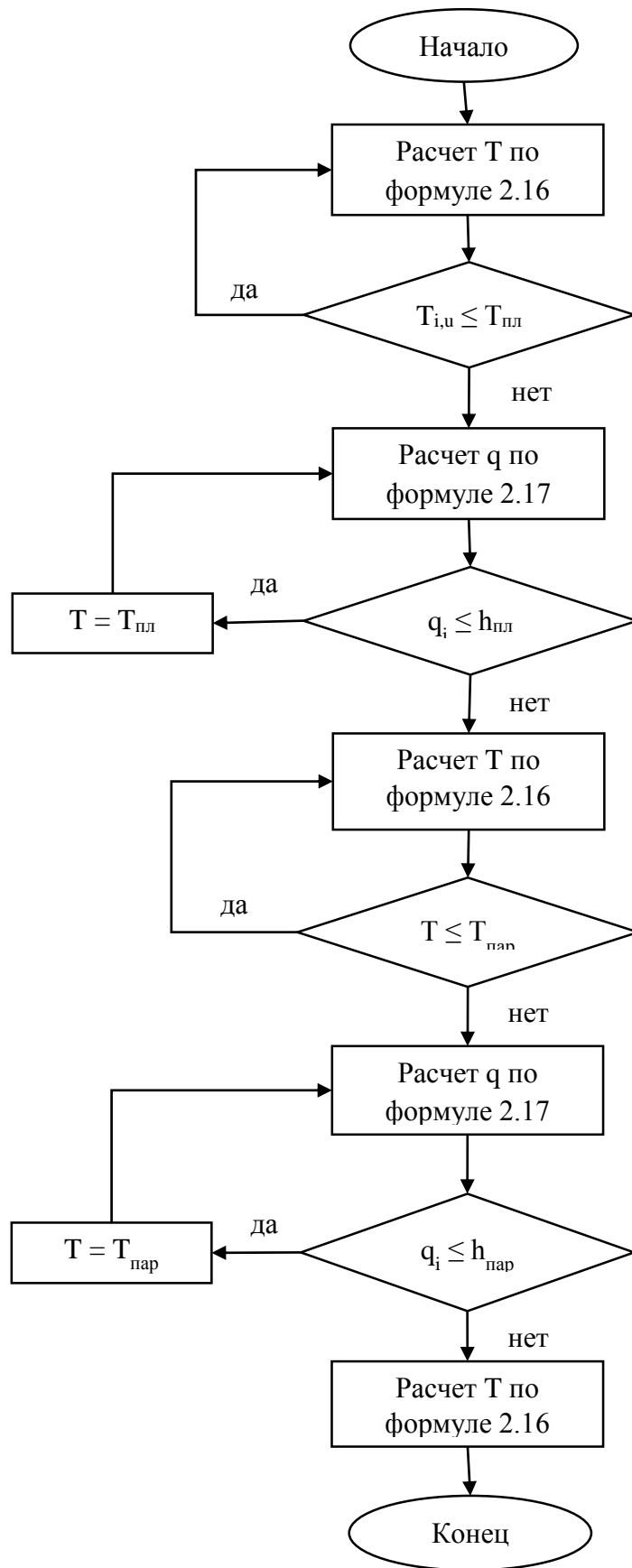


Рисунок 2.2 – Блок-схема учета энтальпии плавления и парообразования

В любых металлургических процессах большую роль в формировании структуры, а, значит, и в повышении стойкости металла к различным видам изнашивания, играет скорость охлаждения и время пребывания металла выше критических точек. Термический цикл плазменной обработки может быть построен из уравнения (2.16). Скорости охлаждения можно определить путем дифференцирования полученного уравнения (2.16) [75]:

$$W = -\frac{dT}{dx}V$$

Получили следующее уравнение скоростей охлаждения:

$$W(x, y, z, \tau) = \frac{qV}{8c\rho(\sqrt{\pi a})^3} \int_0^t \frac{1}{(\sqrt{\tau + t_0})^3} \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{x + V(\tau + t_0)}{a(\tau + t_0)} \exp\left(\frac{(x - V(\tau + t_0))^2 + (y)^2}{4a(\tau + t_0)} - b(\tau + t_0)\right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \exp\left(\frac{(z + 2nL)^2}{4a(\tau + t_0)}\right) + \exp\left(-\frac{(z + 2nL)^2}{4a(\tau + t_0)}\right) \right\} \right], \quad (2.17)$$

Все расчеты и построение графиков выполнены в математическом пакете MathCad 14. Листинг разработанной модели представлен в Приложении А.

## **2.2. Анализ влияния параметров режима плазменной обработки и свойств покрытия на распространение теплоты в композиции «покрытие – основа»**

При расчетах были приняты следующие геометрические параметры композиционного материала:

- толщина основы: 10 мм;
- толщина покрытия: 1; 1,5; 2 мм.

В качестве материала для нанесения покрытия были выбраны экономно легированные ПП марки ППМ-6 и ППМ-8 (таблица 2.1), широко применяемые для нанесения износостойких покрытий.

Таблица 2.1 – Химический состав используемых ПП

Марка ПП	Массовая доля элементов, %				
	C	Cr	Ti	Al	Fe
ППМ-6	1,5	0,8	2,1	0,9	осн.
ППМ-8	0,8	22,5	2,1	2,1	осн.

Для определения химического состава покрытия, с учетом выгорания элементов, необходимо знать их коэффициенты перехода в металл покрытия при активированной дуговой металлизации. Согласно данным [95], коэффициенты перехода следующие: Al – 0,8; Cr – 0,9; Ti – 0,6; C – 0,5. Химический состав покрытий, рассчитанный с учетом приведенных данных, представлен в таблице 2.2. Приняли, что пористость напыленных покрытий составляет 2,5 % [30].

Таблица 2.2 – Расчетный химический состав покрытий

Марка	C	Cr	Ti	Al	Fe
ППМ-6	0,75	7,20	1,20	0,80	осн.
ППМ-8	0,40	19,80	1,20	1,60	осн.

Примем, что доля участия оксидных прослоек в покрытии составляет 10 %. В таблице 2.3 представлены значения теплофизических характеристик оксидов, образующихся при напылении рассматриваемых ПП, а также, их доля участия в шлаке [96–98]. Расчет теплофизических характеристик покрытия осуществим по аддитивной зависимости (2.9).

Таблица 2.3 – Теплофизические характеристики и доля участия оксидов в шлаке

Характеристика	FeO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
$\lambda$ , Вт/м·°С	7	10	12	5
$c$ , Вт/кг·°С	766	781	1051	794
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	5750	5210	3970	4260
доля участия V, %	8	6	11	75

В качестве материала основы выбрана среднеуглеродистая сталь 40. Теплофизические характеристики покрытия, с учетом его пористости, выгорания легирующих элементов и наличия оксидных прослоек, рассчитанные по формулам (2.8, 2.10, 2.11), а также, справочные данные характеристик для основы представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Теплофизические характеристики покрытий и основы

Материал	$\lambda$ , Вт/м·°С	$c$ , Вт/кг·°С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_n$ , °С	$T_{нар}$ , °С
Сталь 40	34	481	7850	1510	2735
ППМ-6	23,2	682	7115	1401	
ППМ-8	20,1	669	7115	1436	

Результаты предварительных расчётов, показали, что существенную роль на теплопроводность напыленного покрытия оказывает пористость (рисунок 2.3). Повышение пористости значительно снижает теплопроводность покрытия, что уменьшает проплавливающую способность [99]. Так, например, увеличение пористости покрытия на 1 % приводит к снижению теплопроводности покрытия на 6 %.

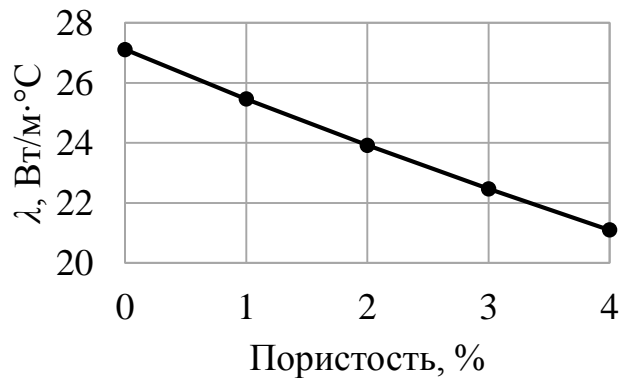


Рисунок 2.3 – Влияние пористости на теплопроводность покрытия

Помимо пористости на теплопроводность покрытия влияет также и его химический состав [93]. Самое большое влияние на теплопроводность оказывает содержание углерода (рисунок 2.4), каждый процент которого приводит к

снижению теплопроводности на 7,5 %, повышение содержания Cr и Ti на 1 % снижает теплопроводность на 2 %, а Al на 3,5 %.



Рисунок 2.4 – Влияние легирующих элементов на теплопроводность покрытия:

1 – C; 2 – Al; 3 – Ti, Cr

В результате расчетов по уравнению (2.16), получили распределение изотерм в плоскости YOZ, расположенной в центре источника нагрева (рисунок 2.5). Видно, что температуры в композиции распределяются неравномерно, что связано с большой разницей в теплопроводностях покрытия и подложки. Высокая теплопроводность подложки обуславливает большую скорость распространения в ней температуры по сравнению с покрытием.

Наиболее важным параметром дуговой сварки является ее погонная энергия  $q_{п} = 0,24 \cdot I \cdot U \cdot \eta / V$ , где  $\eta$  – КПД плазмотрона 80 % [100]. Влияние погонной энергии плазменной обработки на глубину проплавления покрытия описывается кривыми, представленными на рисунке 2.6. Изолинии 1 соответствует значение погонной энергии, при котором оплавление покрытия происходит не на всю глубину. Изолиния 2 показывает режим, при котором происходит полное оплавление покрытия без плавления основы. При этом, зона оплавления проходит по границе раздела «покрытие – основа», что связано с большей теплопроводностью и температурой плавления основы по сравнению с покрытием, следовательно, для расплавления основы необходимо затратить



больше энергии. Режиму полного проплавления покрытия и основы соответствует изолиния 3. В модели принято скачкообразное изменение теплофизических характеристик на границе между покрытием и основой. Этим объясняется характер изменения изолинии 3 на границе. В реальности на границе между покрытием и основой будет переходный участок с изменяющимися теплофизическими характеристиками. Точность представленных расчетов по модели мы оценим при их сравнении с геометрическими параметрами зоны оплавления, полученными в ходе натурального эксперимента.

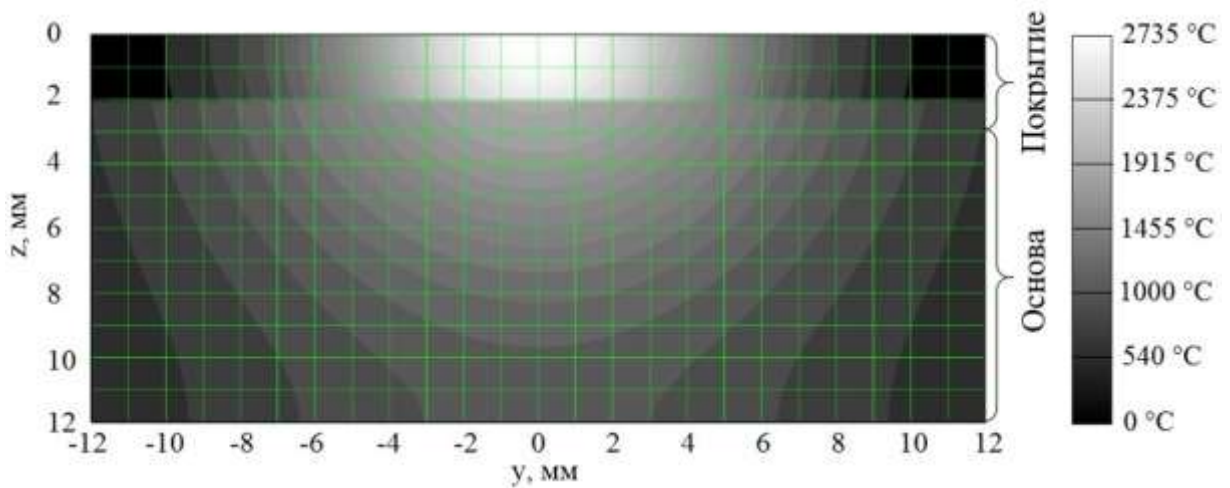


Рисунок 2.5 – Распределение изотерм в композиции «покрытие – основа»

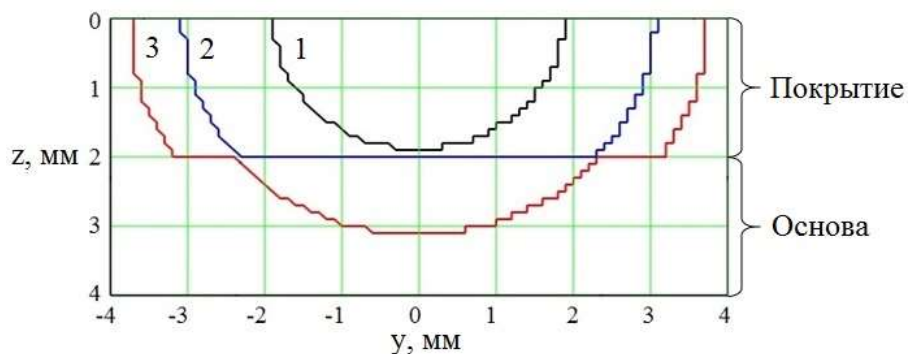


Рисунок 2.6 – Расчетные кривые проплавления покрытия при различных значениях погонной энергии:

0,25 МДж/м – 1; 0,40 МДж/м – 2; 0,55 МДж/м – 3

На рисунке 2.7 показан график зависимости глубины проплавления подложки от погонной энергии плазменной обработки, при различных значениях толщины напыленного покрытия. При разной толщине покрытий, наблюдается пропорциональный рост глубины проплавления от погонной энергии, однако с увеличением толщины покрытия наблюдается повышение среднего значения погонной энергии, необходимой для проплавления.

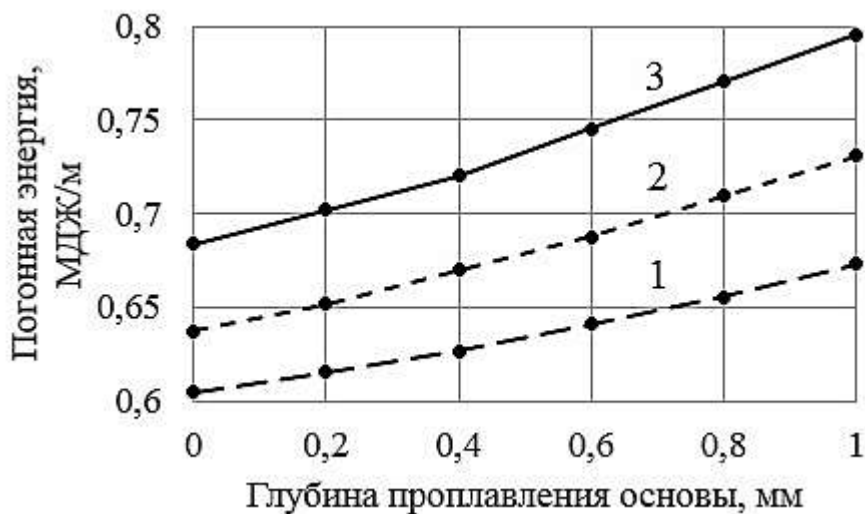


Рисунок 2.7 – Зависимость глубины проплавления подложки от погонной энергии, при различной толщине покрытия: 1 – 1 мм; 2 – 1,5 мм; 3 – 2 мм

Для определения влияния параметров режима плазменного оплавления на распределение температур в композиции «покрытие – основа» проведен ряд расчетов, при изменении одного параметра обработки и постоянстве остальных (таблица 2.5). Так как напряжение в плазменных процессах является функцией от параметров режима обработки, а в разработанной модели данное влияние не учитывается, то примем его средним в интервале значений используемых токов 150–180 А, в соответствии с опытными данными [100].

По полученным в результате расчетов на выбранных режимах графикам распределения границы оплавления (рисунок 2.6) оценивали глубину и ширину проплавления. Далее произведены расчеты коэффициента формы проплавления  $\psi$ , равного отношению ширины оплавленной зоны  $e$  к ее глубине  $h$ .

Таблица 2.5 – Опытные параметры режима обработки

№ опыта	Ток $I$ , А	Напряжение $U$ , В	Скорость обработки $V$ , м/ч	Диаметр сопла $ds$ , мм	Длина канала сопла $ls$ , мм	Расстояние от сопла до изделия $hs$ , мм	Расход плазм. газа $Gp$ , л/мин
1	130; 150; 170	29	6	4	3	8	3
2	150		5; 6; 7;	4	3	8	3
3	150		6	3; 4; 5	3	8	3
4	150		6	4	2; 3; 4	8	3
5	150		6	4	3	6; 8; 10	3
6	150		6	4	3	8	2; 3; 4

Результаты обработки данных, полученных в результате расчетов, выполненных на режимах из таблицы 2.5, представлены на рисунке 2.8. Проанализировав полученные зависимости можно выделить один незначимый параметр обработки – длина канала сопла  $ls$ , изменение которого не привело к изменению  $\psi$ , однако такой результат объясняется принятым в рамках представленной модели допущением, а именно отсутствием зависимости напряжения на дуге от параметров режима обработки. В действительности, изменение данного параметра, при постоянстве других параметров, приводит к повышению напряжения на дуге, в результате увеличения дугового промежутка, а значит и увеличению тепловложения в изделие. Однако, увеличение  $ls$  приведет также к увеличению тепловложения в сопло плазмотрона в результате повышения площади контакта дуги с соплом, а это значит, что эффективный КПД плазмотрона упадет.

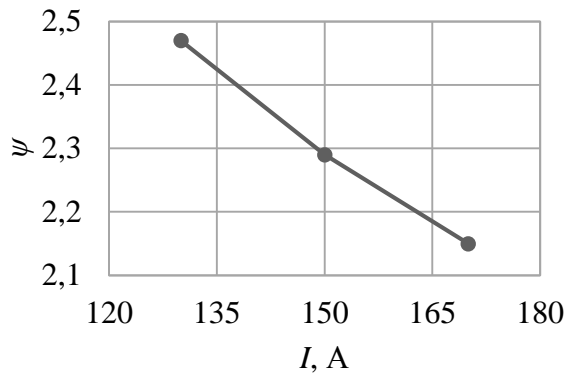
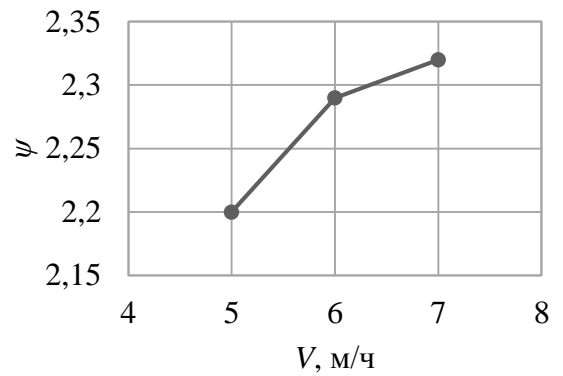
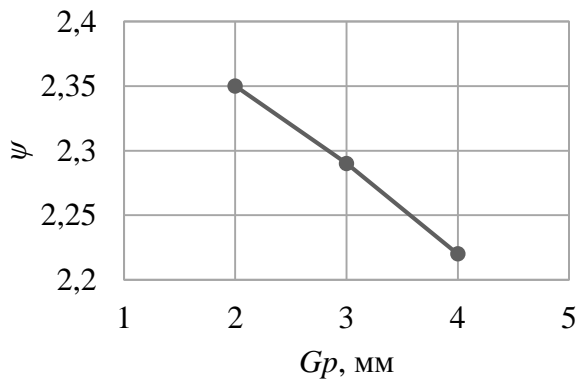
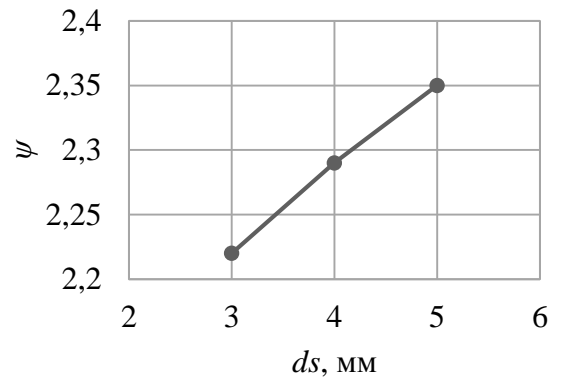
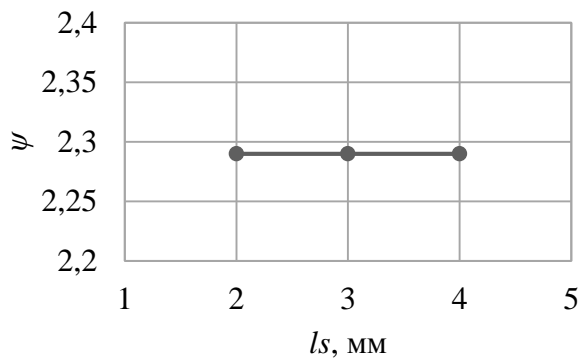
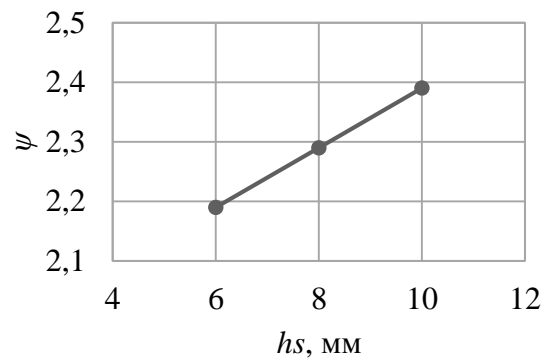
*a**б**в**г**д**е*

Рисунок 2.8 – Зависимость коэффициента формы проплавления от:

*a* –  $I, A$ ; *б* –  $V, м/ч$ ; *в* –  $Gp, л/мин$ ; *г* –  $ds, мм$ ; *д* –  $ls, мм$ ; *е* –  $hs, мм$

Повышение тока  $I$  и расхода плазмообразующего газа  $Gp$  приводит к уменьшению  $\psi$ . Следует отметить, что повышение  $Gp$  оказывает значительное влияние только на глубину проплавления  $h$ , тогда как  $I$  дуги влияет и на ширину зоны оплавления  $e$ . К повышению  $\psi$  приводят увеличение расстояния от среза

сопла плазмотрона до изделия  $hs$ , скорости обработки  $V$  и диаметра плазмообразующего сопла  $ds$ , при этом повышение  $V$  и  $hs$  снижает оба геометрических параметра зоны оплавления, тогда как увеличение  $ds$  приводит к значительному снижению только  $h$ .

Полученные в результате расчетов данные достаточно точно согласуются с полученными Б.О. Христофисом зависимостями влияния параметров обработки на геометрические параметры зоны плазменной закалки [81]. Однако, при повышении  $hs$ , по расчетным данным, приводит к снижению глубины проплавления, тогда как должно приводить к ее увеличению. Такая разница в данных, так же объясняется тем что, в разработанной модели не учитывается влияние параметров режима на падение напряжения на дуге, а также на эффективный КПД плазмотрона [100]. Таким образом, разработанная модель плазменной обработки композиции «основа – покрытие» позволяет оценить влияние режимов плазменной обработки на распределение температур в двухслойном материале, однако, ввиду сложной взаимосвязи напряжения на дуге от технологических параметров обработки она носит лишь приближенный характер.

Для предотвращения отслоения покрытия и повышения его адгезии, необходимо обеспечение температуры плавления на поверхности подложки [60], при этом, с целью уменьшения влияния на свойства оплавленного покрытия доля участия металла подложки должна быть минимальна. Отсюда были выбраны режимы, представленные в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Расчетные параметры режима плазменной обработки

Покрытие	$q_n$ , МДж/м	$ds$ , мм	$ls$ , мм	$hs$ , мм	$Gp$ , л/мин
ППМ-8	0,67	4	2	6	2,5
ППМ-6	0,67	4	2	8	2,5

Таким образом, вследствие отличий в теплофизических характеристиках (таблица 2.2) исследуемых покрытий, режим обработки покрытия из ПП ППМ-6

отличается от покрытия из ППМ-8 только увеличенным расстоянием от среза сопла плазмотрона до изделия. Распределения температурных полей, полученных в результате расчётов, при выбранных режимах обработки представлены на рисунке 2.9. Вследствие малого отличия распределения изотерм в композициях с покрытиями на основе ППМ-6 и ППМ-8 рисунок представлен только один. Полученная по результатам расчетов матрица значений температуры в плоскости YOZ представлена в Приложении Б.

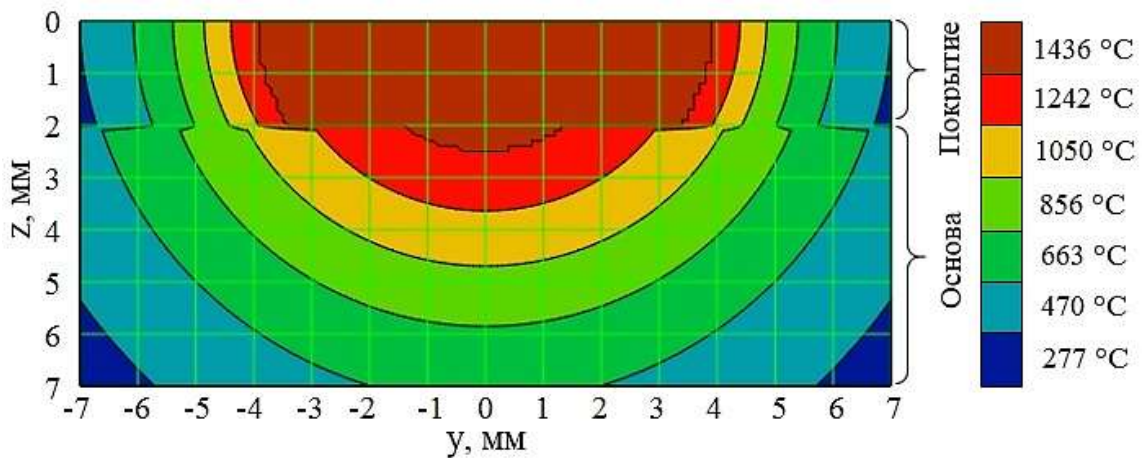


Рисунок 2.9 – Распределение температурных полей при обработке на выбранных режимах

Упрочнение поверхности при оплавлении покрытия осуществляется путем последовательного формирования локальных зон оплавления, с перекрытием слоев. Исходя из рисунка 2.9 для обеспечения проплавления основы по всей поверхности изделия, с целью предотвращения отслоений, и создания монолитного покрытия по всей поверхности, шаг между соседними проходами должен составлять 3–4 мм. Однако вследствие предварительного подогрева от предыдущих проходов, это расстояние может изменяться.

### 2.3. Анализ структурных превращений при оплавлении металлизационного покрытия на основе результатов моделирования

Для прогнозирования структурных превращений в оплавленной зоне необходимо знать время пребывания металла в расплавленном состоянии, а также скорости нагрева и охлаждения. Для этого, используя полученную модель, построим графики термического цикла  $T$  и мгновенных скоростей нагрева и охлаждения  $W$  при плазменной обработке для точек, расположенных в начальный момент времени на расстоянии 25 мм от источника нагрева, на одной оси с ним (рисунок 2.10).

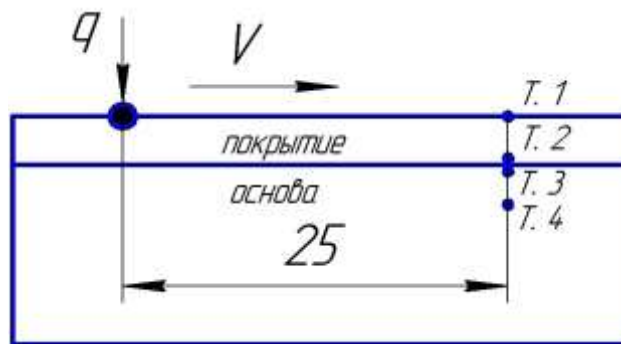
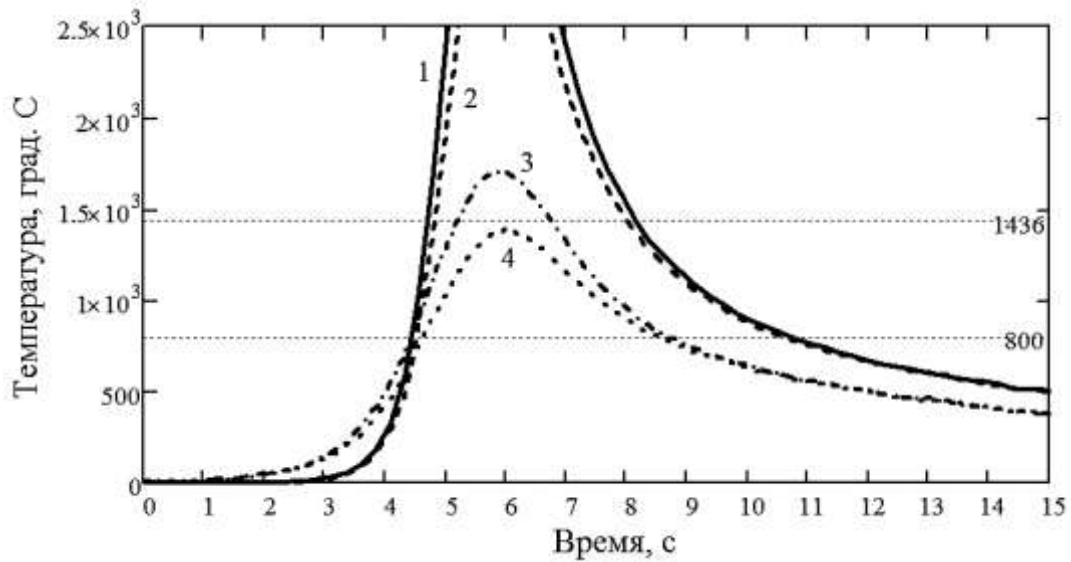


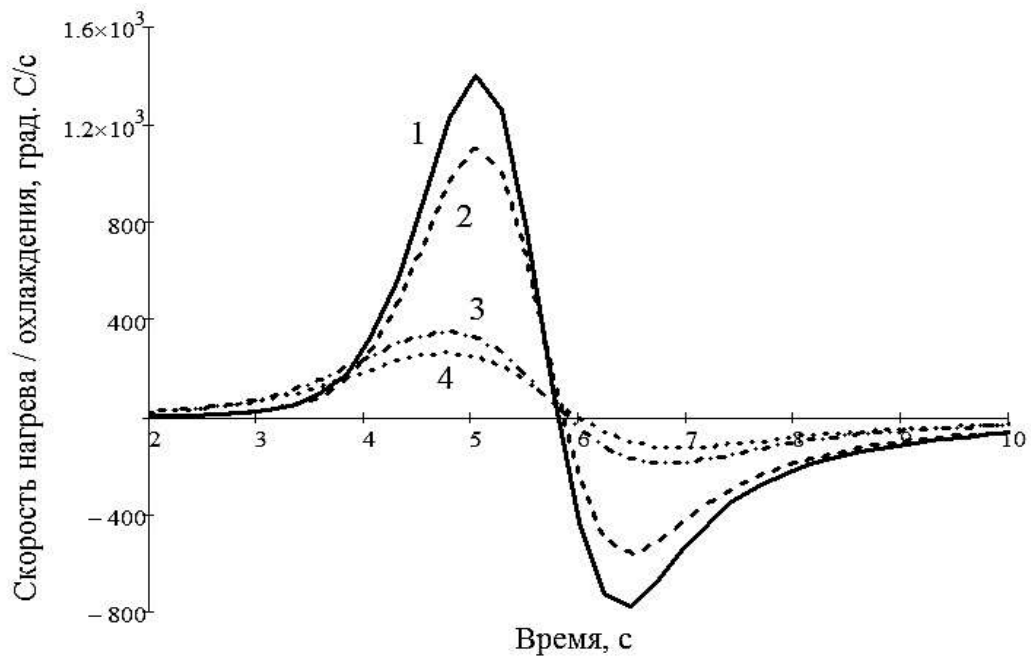
Рисунок 2.10 – Схема расположения рассматриваемых точек

На графике (рисунок 2.11, *a*) видно, что термические циклы для покрытия и подложки сильно отличаются. Температура подложки (кривые 3, 4) начинает возрастать на 1,5 секунды раньше температуры покрытия (кривые 1, 2), что связано с большей теплопроводностью первого. Однако, по мере приближения источника нагрева к рассматриваемым точкам, покрытие нагревается значительно быстрее и сильнее, чем подложка, вплоть до температуры кипения. Такая зависимость хорошо иллюстрируется разрезом модели вдоль оси  $X$  (рисунок 2.12). На графике видно, что точка, расположенная на поверхности покрытия находится в расплавленном состоянии 3,5 с, тогда как поверхность основы всего 1,5 с. Такая разница объясняется тем, что большая часть энергии сжатой дуги расходуется на нагрев и плавление покрытия, а значит и объем

расплавленной ванны покрытия больше чем у основы. Помимо этого, подводимое тепло в основе отводится быстрее, чем в покрытии вследствие большей толщины и теплопроводности.



*a*



*б*

Рисунок 2.11 – Графики термического цикла обработки (а), скоростей нагрева и охлаждения (б) точек, расположенных на разной глубине композиции от поверхности покрытия:

1 – 0 мм (поверхность покрытия); 2 – 2 мм (покрытие); 3 – 2,1 мм (поверхность подложки); 4 – 4 мм (подложка)



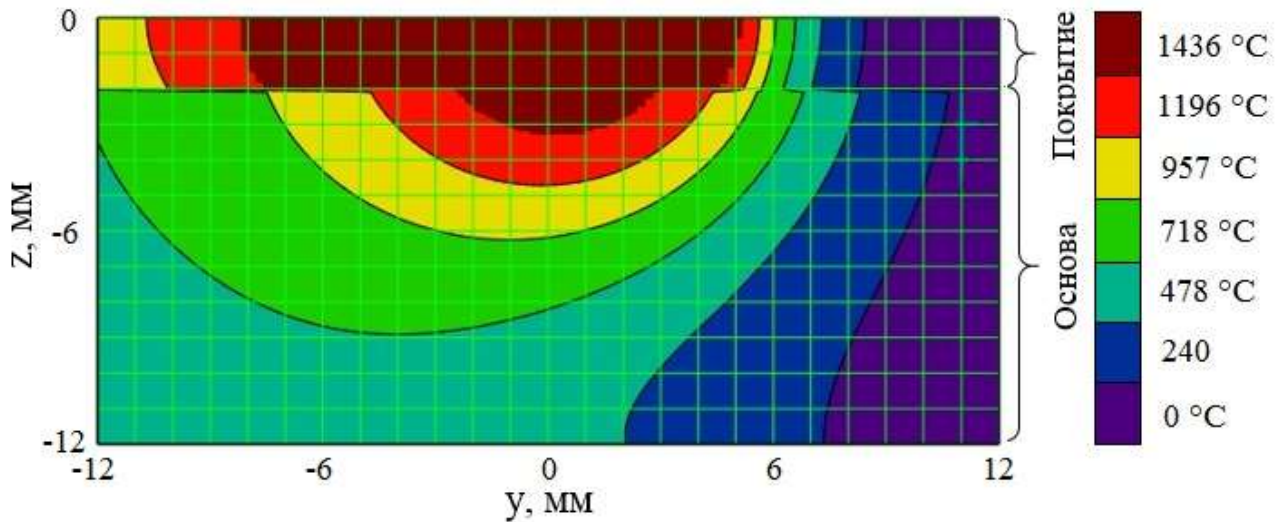


Рисунок 2.12 – Распределение изотерм в плоскости  $XOZ$

При высоких температурах ( $T > T_{пл}$ ), в покрытии наблюдаются более высокие скорости нагрева и охлаждения (рисунок 2.11, б) чем в основе, так максимальная скорость охлаждения поверхности покрытия составляет  $770\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , тогда как у подложки всего  $200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . Такие скорости охлаждения выше критических для углеродистых сталей. Однако, в интервале температур  $T_{пл} - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , средняя скорость охлаждения металла покрытия и основы выравнивается и составляет  $120-130\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . Таким образом, охлаждение композиции происходит с большой степенью переохлаждения, что благоприятно для получения мелкодисперсной структуры мартенситного типа.

В первом приближении кристаллизующийся переплавленный металл покрытия можно представить, как квазиравновесную систему, в которой фазовые превращения в процессе охлаждения происходят в последовательности, определяемой с помощью вертикальных разрезов диаграммы состояния Fe-C-Cr при 8 % Cr для ППМ-6 (рисунок 2.13, а) и 22 % Cr для ППМ-8 (рисунок 2.13, б), построенных на основании данных [101, 102], естественно, с отклонением от равновесной в тем большей степени, чем больше скорость охлаждения в процессе кристаллизации.

При оплавлении покрытий на основе ПП ППМ-6 в первую очередь образуются кристаллы аустенита дендритной морфологии, между осями которых кристаллизуется эвтектика аустенит + карбид типа  $M_7C_3$ , в областях твердого раствора (аустенита), обогащенных углеродом и хромом, в соответствии с разрезом диаграммы состояния, наряду с карбидом типа  $M_7C_3$ , возможно образование вторичных карбидов  $M_{23}C_6$ . В процессе последующего охлаждения, в зависимости от его скорости, в твердом состоянии развивается процесс выделения избыточных карбидов и происходит мартенситное превращение переохлажденного аустенита, т.к. скорость охлаждения оказывается выше критической для твердого раствора, легированного хромом. Таким образом, в процессе кристаллизации ожидается получение структуры мартенсита, пластинчатой морфологии, расположение которых наследуют дендриты аустенита, окруженные сеткой карбидной эвтектики. В рассматриваемом случае, условия охлаждения далеки от равновесных, протекание мартенситного превращения можно оценить, привлекая термокинетические диаграммы превращения аустенита, имеющиеся для сталей 40X13 и X12 [103].

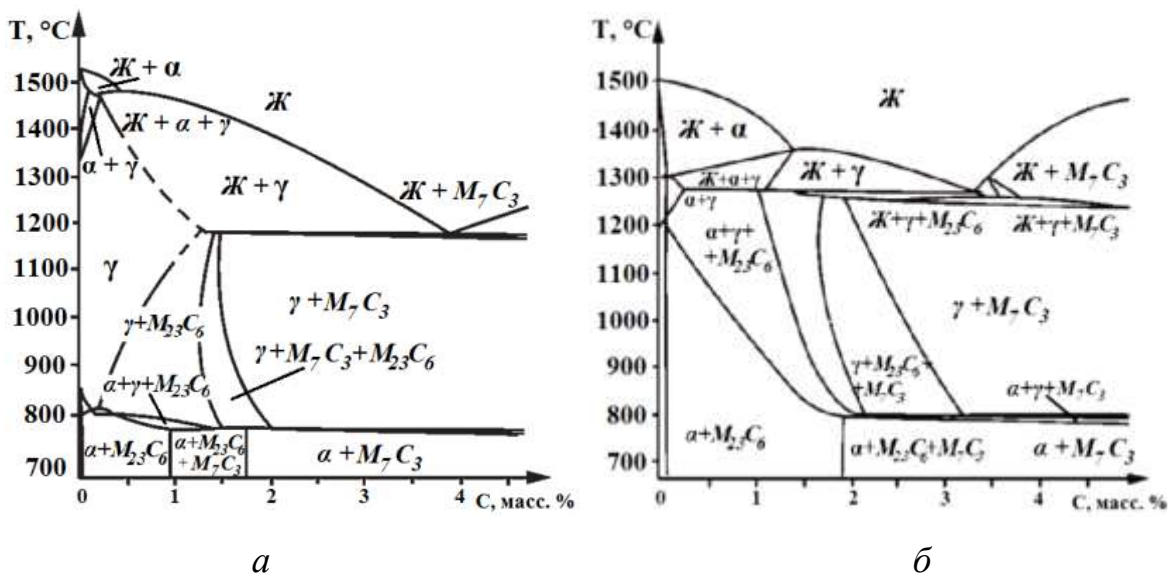


Рисунок 2.13 – Вертикальные разрезы диаграммы состояния Fe-C-Cr:

8 % Cr – а; 22 % Cr – б

Характер и последовательность фазовых превращений в процессе охлаждения оплавленного металла при плазменном воздействии на покрытие ППМ-8 принципиально аналогичны тем, которые происходят в процессе кристаллизации оплавленного покрытия из ПП ППМ-6 с некоторыми различиями в температурах и объёме фазовых превращений и морфологии структурных составляющих, образующихся в той же последовательности. Так, твёрдый раствор в покрытии ППМ-8 содержит больше хрома, чем в ППМ-6, а количество образующейся эвтектики соответственно меньше, следовательно, количество образовавшегося мартенсита будет больше. После выделения карбидов в переплавленном металле напылённого покрытия ППМ-8 в аустените содержится по расчёту примерно вдвое меньше углерода и большее количество хрома, по сравнению с ППМ-6. Таким образом, ожидается, что кристаллы среднеуглеродистого мартенсита в переплавленном покрытии ППМ-8, обеспечат высокий уровень твёрдости и износостойкости, сохраняя более высокую трещиностойкость, чем высокоуглеродистый мартенсит в покрытии из ППМ-6.

#### **2.4. Выводы по главе**

1. Разработана математическая модель распространения тепла в двухслойной композиции «металлизационное покрытие – основа», под воздействием плазменного источника нагрева, с учетом параметров режима плазменной обработки, а также влияния неоднородности покрытия на его теплофизические свойства.

2. По результатам расчетов произведена оценка влияния пористости, состава и толщины покрытия на их теплофизические характеристики, а также, параметров режима плазменной обработки на коэффициент формы проплавления композиции. На основе полученных данных определены параметры режима плазменной обработки обеспечивающие сплавление с

основой, при максимальном коэффициенте формы проплавления подложки. Оценка точности разработанной модели будет определена при сравнении расчётных коэффициентов формы проплавления с опытными данными в главе 3.

3. Полученные в результате расчетов графики распределения температур, термический цикл и скорости нагрева и охлаждения позволяют оценить структурные превращения, происходящие в материале покрытия в процессе кристаллизации. Предполагается, что металл оплавленных покрытий из ПП ППМ-6 и ППМ-8 будет обладать мартенситной структурой дендритной морфологии с выделением первичных и вторичных карбидов. Количество мартенситной фазы в оплавленном слое из ППМ-8 вследствие высокого содержания хрома будет больше что обеспечит большую твердость покрытия, а сниженное содержание углерода будет обуславливать большую пластичность мартенсита, значит, и большую трещиностойкость полученных покрытий. Следовательно, в дальнейших исследований, с точки зрения большей износостойкости, будем использовать ПП ППМ-8.

### **3. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, ОПЛАВЛЕННЫХ ПЛАЗМОЙ**

В этой главе исследовали зависимость структуры, физико-механических и служебных свойств металлизационных покрытий до и после плазменного оплавления на режимах, выбранных в результате математического моделирования тепловых процессов в композиции «покрытие – основа» и сравнивали показатели служебных свойств покрытий и наплавленных слоев.

#### **3.1. Материалы для исследования**

Для нанесения металлизационных покрытий была использована ПП марки ППМ-8 состава  $80X22T2Ю2$ , диаметром 2 мм (таблица 2.1) [36]. Ее также применяли для наплавки слоев и проведения сравнительных испытаний стойкости оплавленных и наплавленных покрытий. В качестве основы использовали пластины из углеродистой стали 40 по ГОСТ 1050-88.

При напылении и оплавлении покрытий применяли следующие материалы: ПП ППМ-8; сталь 40 по ГОСТ 1050-88; ацетон ГОСТ 2768-84; дробь чугунную колотую марки ДЧК 1 ГОСТ 11964-81; сжатый воздух 5 класса ГОСТ 17433-80; пропан ГОСТ 20448-90; аргон высшего сорта по ГОСТ 10157-79.

При исследовании структуры, физико-механических и служебных свойств покрытий применяли смесь концентрированных азотной  $HNO_3$  по ГОСТ 4461 и соляной  $HCl$  по ГОСТ 3118 кислот, взятых в соотношении 1:3 по объёму (царская водка), пасту ГОИ № 2 ТУ 6-18-36, алмазную пасту НОМ 60/40 ГОСТ 25593, шкурку шлифовальную бумажную зернистостью 25 по ГОСТ 6456.

Струйно-абразивную обработку (САО) поверхности перед напылением покрытия производили при параметрах, указанных в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры предварительной САО

Диаметр сопла пистолета, мм	Дистанция, мм	Давление воздуха, МПа	Угол атаки, град.
8	150	0,6	70-90

Покрyтия толщиной 2<sub>-0,3</sub> мм наносили на стальные пластины размерами 240×70×10 мм после САО с помощью аппарата активированной дуговой металлизации (АДМ) на режимах, указанных в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры режима АДМ

Ток, А	Напряжение, В	Скорость перемещения аппарата, м/ч	Дистанция напыления, мм	Давление воздуха, МПа	Давление пропана, МПа
200	28	360	100	0,30	0,32

Для осуществления плазменного оплавления металлизационных покрытий использована многоцелевая установка для плазменной обработки [104] (рисунок 3.1), представляющая собой плазменную горелку [105, 106] (рисунок 3.2), установленную на универсальном наплавочном станке У-653, блок управления плазмотроном [107] и источник питания ВД-306Ф. Опыты проводились на токах прямой и обратной полярности. При работе плазмотрона на прямой полярности в качестве катода использовали лантанированный вольфрамовый пруток запрессованный в медный водоохлаждаемый электрододержатель (рисунок 3.2, а), при работе на обратной полярности – медный водоохлаждаемый анод с вольфрамовой вставкой (рисунок 3.2, б). В плазмотроне используется тангенциальная система подачи плазмообразующего газа. В качестве защитного и плазмообразующего газа использовался аргон. Параметры режима плазменной обработки, выбранные по результатам расчетов в построенной модели, приведены в таблице 3.3. Оплавление всей поверхности пластины, производилось путем последовательного формирования локальных участков

оплавления, с шагом 3,5–4 мм. Работы по плазменной обработке покрытий проводились совместно с д.т.н. Щицыным Ю.Д., кафедры «СП и ТКМ» ПНИПУ.

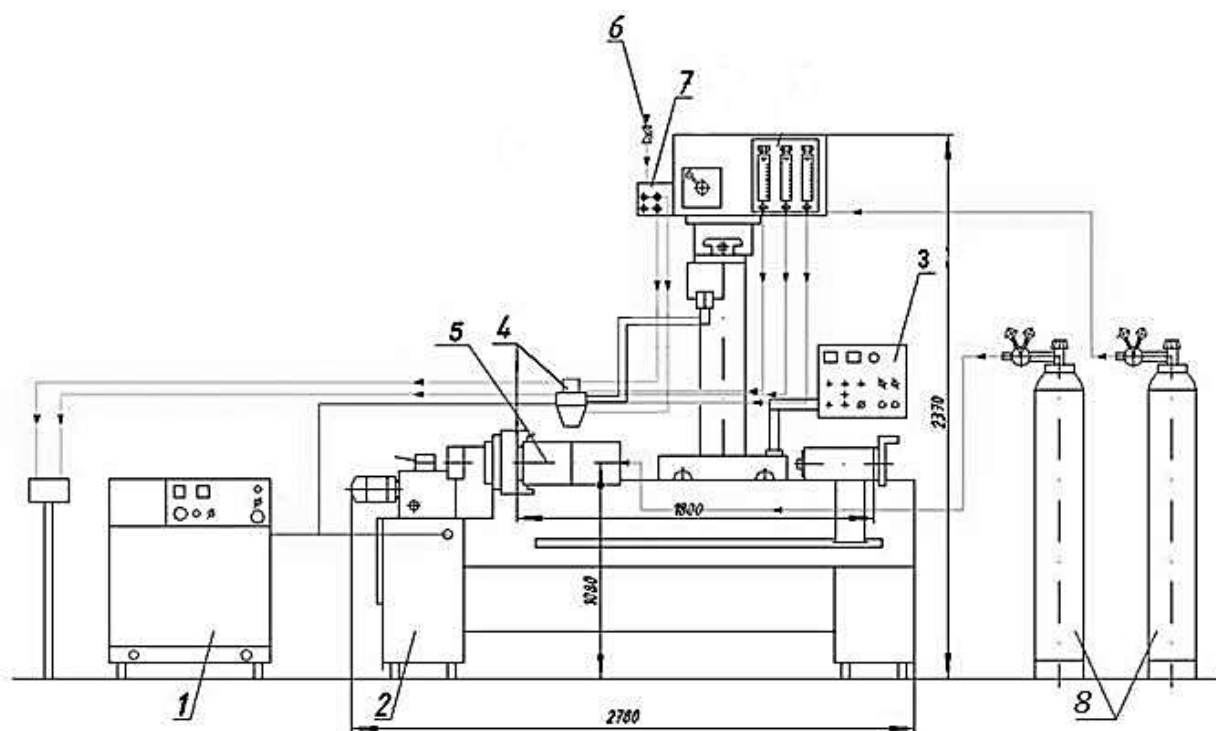


Рисунок 3.1 – Установка плазменного оплавления покрытий: 1 – источник питания ВД-306Ф; 2 – наплавочный станок У-653; 3 – пульт управления; 4 – плазмотрон; 5 – изделие; 6 – вентиль; 7 – распределитель воды; 8 – баллоны с аргоном

Таблица 3.3 – Параметры режима плазменного оплавления

Полярность	Погонная энергия, МДж/м	Диаметр сопла, мм	Дистанция обработки, мм	Расход плазмообразующего газа, л/мин	Расход защитного газа, л/мин
Прямая	0,67	4	6	2,5	4,5
Обратная	0,61	4	6	3	4,5

Выбранные режимы соответствуют полученным по расчетам согласно разработанной математической модели распределения температур в композиции под воздействием плазменного источника нагрева (см. главу 2).

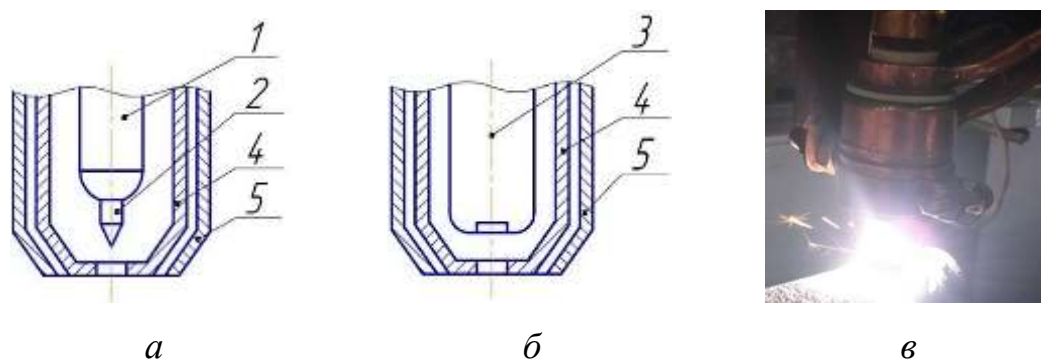


Рисунок 3.2 – Схемы плазмотронов: для работы на прямой полярности – *а*; на обратной полярности – *б*; плазмотрон в действии – *в*

1 – медный электрододержатель; 2 – вольфрамовый электрод-катод; 3 – медный электрод-анод с вольфрамовой вставкой; 4 – плазмообразующее сопло; 5 – защитное сопло

Для сравнения свойств покрытий после плазменного оплавления с наплавленным металлом выполнили аргонодуговую наплавку исследуемой ПП. Наплавку выполняли в двух вариантах: 1 слой и для уменьшения влияния перемешивания с основным металлом в 3 слоя. Режимы наплавки – ток 170 А, напряжение 34 В. Наплавку слоев выполняли непрерывно, без охлаждения слоев.

### 3.2. Методы исследования

Для проведения исследований, из пластин после напыления, оплавления и наплавки, вырезали на электроэрозионном проволочно-вырезном станке AGIE CHARMILLES CUT 20 образцы размерами  $10 \times 10 \times (10+h)$  мм, где  $h$  – толщина покрытия (рисунок 3.3). Подготовку шлифов металлизационных покрытий до и после плазменного оплавления выполняли на станке Laborol с использованием пасты ГОИ № 2 и алмазной пасты НОМ 60/40. Травление образцов осуществляли царской водкой.



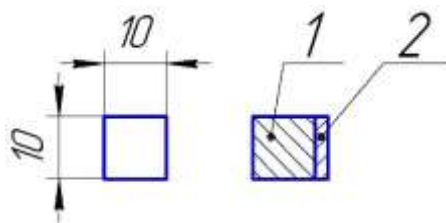


Рисунок 3.3 – Схема исследуемых образцов: 1 – основа; 2 – покрытие

Фазовый состав покрытий определяли на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance в  $\text{Cr-K}\alpha$  излучении. Структуру и микрохимический состав покрытий изучали на оптическом микроскопе ЛабоМет-3 и сканирующем электронном микроскопе VEGA II XMU. Микротвердость по их сечению измеряли на микротвердомере Shimadzu HMV-G21DT при 0,5 Н (50 гс) и 3 Н (300 гс). Исследования выполнены совместно с Р.А. Савраем в лаборатории конструкционного материаловедения ФБГУН ИМАШ УрО РАН.

Химический состав с поверхности покрытий определяли фотоэлектрическим спектральным методом по ГОСТ 18895-97. Исследования выполнены совместно с Ю.И. Орловым в лаборатории аналитического контроля ОАО «УИМ».

Износостойкость определяли для образцов металлизационных покрытий до и после плазменного оплавления, а также наплавленных слоев путем совершения возвратно-поступательных движений по шлифовальной бумаге на основе электрокорунда (рисунок 3.4). Путь трения образца за одно испытание при скорости движения 0,158 м/с устанавливали равным 60 м. Нормальная нагрузка на образец – 10 кг, удельная нагрузка 1 МПа. Длина одного рабочего хода образцов составляла 0,125 м, с шагом образца за один рабочий ход – 0,0012 м. Показатель износостойкости покрытий, равный отношению изменений массы эталона и образца, определяли по результатам трех испытаний. В качестве эталона принимали металлизационное покрытие до плазменного оплавления. Исследования выполнены совместно с М.А. Филипповым на кафедре металловедения ИММТ УрФУ.

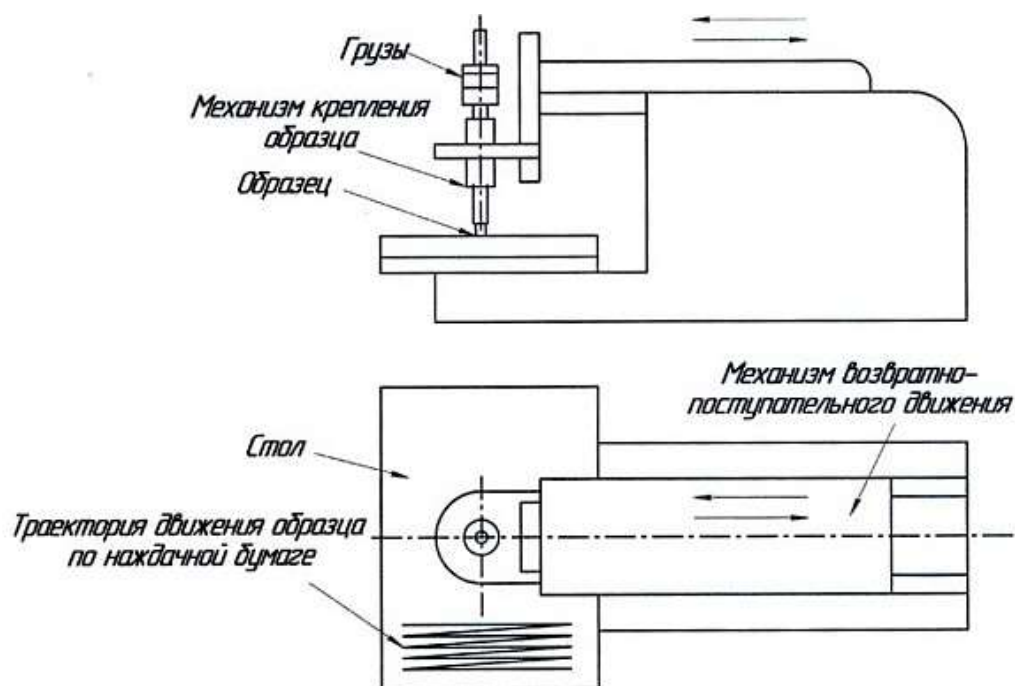


Рисунок 3.4 – Схема изнашивания по закрепленному абразиву

### 3.3. Результаты исследования и их анализ

Металлизационное покрытие имеет характерную для всех видов напыления слоистую структуру и состоит из сильно деформированных зерен – ламелей, толщиной 5–10 мкм (рисунок 3.5). Толщина покрытия составляет 1840 мкм. Видно, что покрытие характеризуется значительной неоднородностью структуры, наличием пор и несплошностей. Трещин в покрытии не обнаружено. Граница между покрытием и основанием имеет характерный зигзагообразный вид. В процессе напыления произошло хорошее соединение с основанием, о чем говорит отсутствие темной оксидной прослойки на границе покрытия с основой.

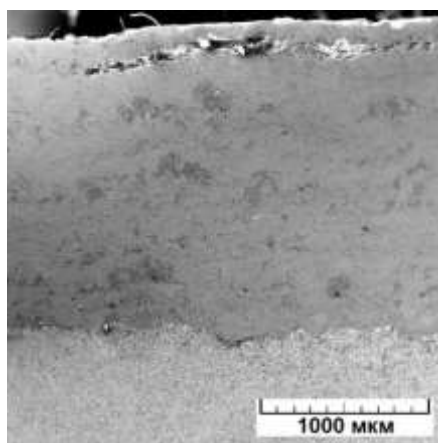


Рисунок 3.5 – Макрошлиф напыленного АДМ покрытия

Травление выявляет несколько характерных цветов и оттенков структурных составляющих (рисунок 3.6). Покрытие представляет собой тонкие чередующиеся волнообразные прослойки белого, серого и чёрного цвета, различной величины и конфигурации [43]. Также наблюдается включения довольно крупных частиц более округлой и глобулярной формы. Кроме того, присутствуют поры глобулярной и дискообразной формы. Вероятно, участки темно-серого и черного цвета являются оксидными прослойками. Слабое воздействие травителя на белые структурные составляющие, говорит о том, что это металлическая матрица с большим содержанием легирующих элементов. Эти металлические фрагменты представляют собой твёрдый раствор хрома в мартенсите. В наиболее крупных частицах покрытия наблюдается структура точечного характера, похожая на отпущенный мартенсит с включениями дисперсных карбидов.

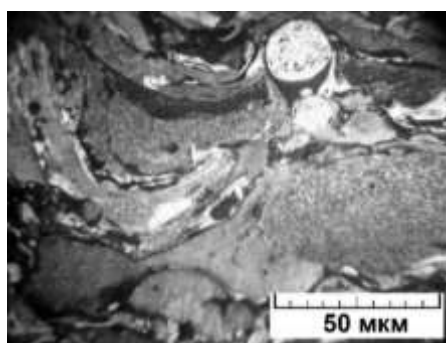


Рисунок 3.6 – Микроструктура напыленного АДМ покрытия

Плазменная обработка покрытия выполнялась на токах прямой и обратной полярности. Несмотря на высокую тепловую эффективность плазменной поверхностной обработки на токе обратной полярности, ее применение для оплавления металлизационного покрытия дает отрицательные результаты. При выполнении такой обработки наблюдается привязка катодного пятна к локальным участкам покрытия, видимо к включениям тугоплавких элементов, что приводит к стягиванию расплавленного металла покрытия в данной зоне и образованию шарообразных участков переплавленного покрытия.

При выполнении оплавления на токе прямой полярности наблюдается равномерное плавление покрытия, без локальных привязок вдоль зоны обработки. Зона оплавления, образованная в результате единичного прохода плазматрона, напоминает наплавленный валик, что объясняется действием поверхностного натяжения на расплавленный металл. Макрошлиф поперечного сечения оплавленной зоны (рисунок 3.7) показывает, что плазменное оплавление приводит к уплотнению структуры металла покрытия за счет устранения его неоднородностей, при этом периферийный металл стягивается в центральную зону, образуя подрезы на поверхности напыленного покрытия. Полученные геометрические параметры зоны оплавления коррелируют с результатами расчетов в разработанной модели, при этом разница между расчетным и опытным коэффициентом формы проплавления составила не более 20 %. Такой точности расчетов достаточно для оценки области рациональных параметров обработки.

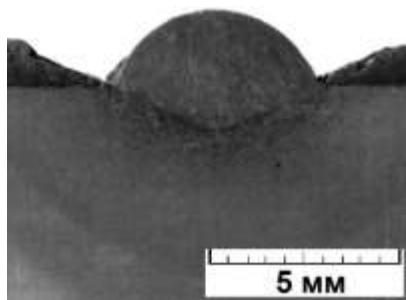


Рисунок 3.7 – Макрошлиф локальной зоны оплавления

Плазменная обработка напыленного покрытия с перекрытием локальных зон оплавления привела к его полному переплаву и устранению структурных неоднородностей (рисунок 3.8). Каждый последующий проход приводил к оплавлению напыленного покрытия и металла предыдущего прохода, при этом формировалась ровная поверхность оплавленного покрытия. Толщина переплавленного покрытия составляет 2380 мкм. Следовательно, по изменению толщины покрытия, смещение с основой после плазменного оплавления составляет примерно 40 %.

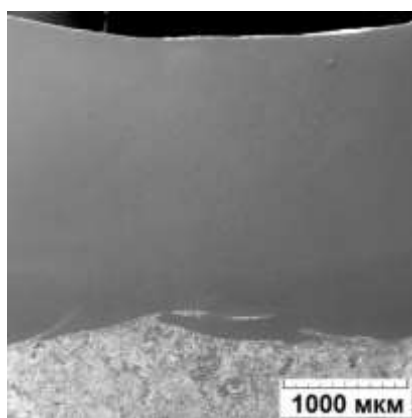


Рисунок 3.8 – Макрошлиф металлизационного покрытия после плазменного оплавления

Оплавленное покрытие имеет однородную структуру, в которой, на первый взгляд, отсутствуют оксидные фазы, в большом количестве имевшиеся в исходном напыленном покрытии [108]. Однако на снимке поперечного сечения, нетравленого образца, при увеличении в 1000 раз видны черные вкрапления круглой формы, размером до 2 мкм (рисунок 3.9, *а*), предположительно оксидов или пустот. На снимке протравленного образца видно, что данные включения и карбиды, располагаются преимущественно по границам зерен (рисунок 3.9, *б*).

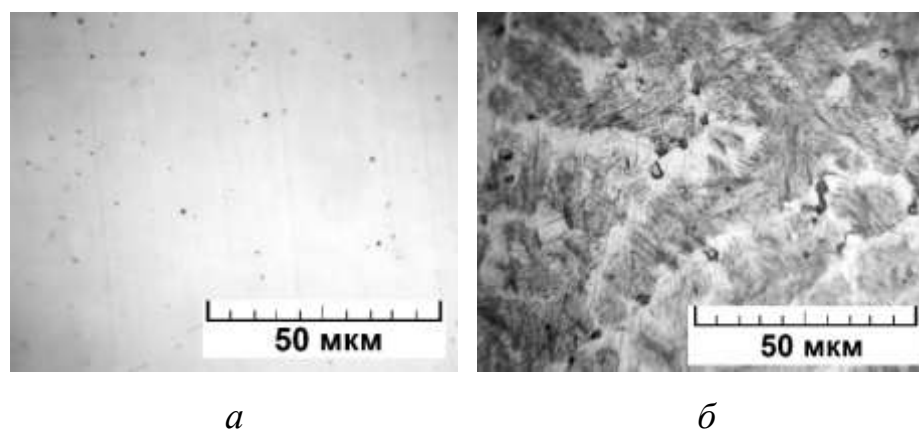


Рисунок 3.9 – Микроструктура оплавленного покрытия: до травления – *а*, после травления – *б*

Металлографическое изучение поперечных шлифов показало, что зона сплавления и ЗТВ оплавленного покрытия имеют типичный для наплавленных слоев вид (рисунок 3.10). В прилегающем к оплавленному покрытию слое основного металла наблюдается тонкая (50 мкм) зона обезуглероживания. ЗТВ состоит из характерных участков и имеет феррито-перлитную структуру [109]. При большом увеличении по всему сечению покрытия наблюдается игольчатая структура мартенсита. Структура переплавленного покрытия имеет дендритное строение и состоит из четырёх основных характерных зон в порядке их расположения от основного металла к поверхности оплавления (рисунок 3.10, *а*).

Зона 1. К основной стали примыкает тонкая зона, толщиной 50–150 мкм, состоящая из мелких равноосных зерен 8–9 баллов. Такая структура образуется при больших степенях переохлаждения, в результате быстрого теплоотвода от расплавленного покрытия в основу с большим коэффициентом теплопроводности.

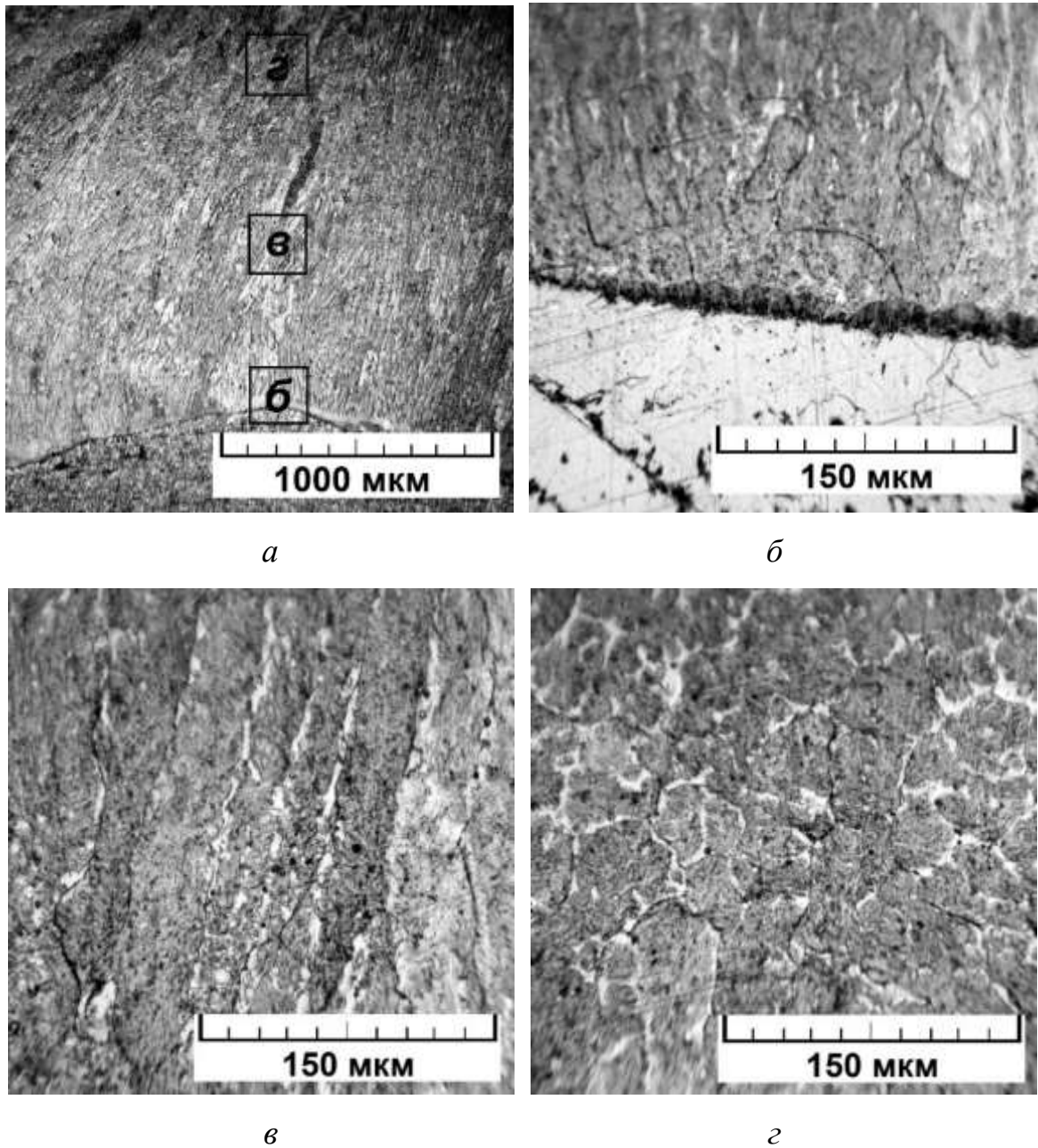


Рисунок 3.10 – Микроструктура оплавленного покрытия после травления:

*а* – общий вид, *б* – зоны 1 и 2, *в* – зона 3, *г* – зона 4

Зона 2. К 1-ой зоне примыкает тонкий слой, до 50–100 мкм, равноосных зерен несколько более крупнозернистого (6–7 балл) металла. 1 и 2 слои по структуре представляют собой пакетный мартенсит, характерный по морфологии для мало- и среднеуглеродистых сталей с содержанием углерода до 0,5–0,6 % [110], содержащий выделения дисперсных карбидов. Такое строение этой зоны можно объяснить снижением скоростей охлаждения при приближении

к центру переплавленного слоя. Вследствие малой толщины 1 и 2-ой зон их строение показано на рисунке 3.10, б.

Зона 3. 1 и 2-ая зоны равноосных зёрен переходят в основной слой вытянутых столбчатых зёрен (дендритов), длиной 300–500 мкм и шириной 30–60 мкм, ориентированных преимущественно в направлении максимального теплоотвода, т.е. перпендикулярно к поверхности раздела переплавленного и основного металла (рисунок 3.10, в). Толщина этой зоны составляет 1500–2000 мкм. Структура зёрен представляет собой пакетный мартенсит одной – двух ориентировок, окруженный тонкой оболочкой карбидной эвтектики.

Зона 4. Верхняя часть переплавленного покрытия (рисунок 3.10, г), толщиной до 500 мкм, состоит из равноосных зёрен размером 20–50 мкм, состоящих из мартенсита с выделением дисперсных карбидов. Данная зона образуется в результате равномерного теплоотвода на поверхности оплавленного слоя при прогреве покрытия.

Общий вид металла, наплавленного порошковой проволокой ППМ-8 в один слой представлен на рисунке 3.11, а.

Наплавленный металл имеет характерную ячеистую структуру и состоит из легированного мартенсита [109] с выделившимися по границам зёрен крупными частицами упрочняющих фаз (рисунок 3.11, б). Толщина наплавленного слоя составляет 1,750 мм. Видно, что металл характеризуется однородностью структуры, отсутствием крупных пор и несплошностей. Линия сплавления с подложкой плотная, переходная зона к основному металлу отсутствует (рисунок 3.11, в).



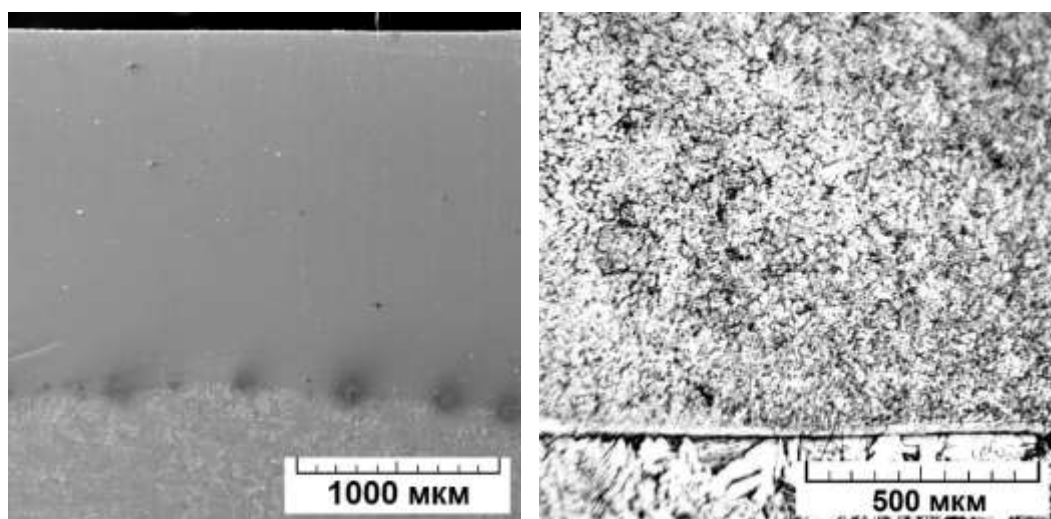
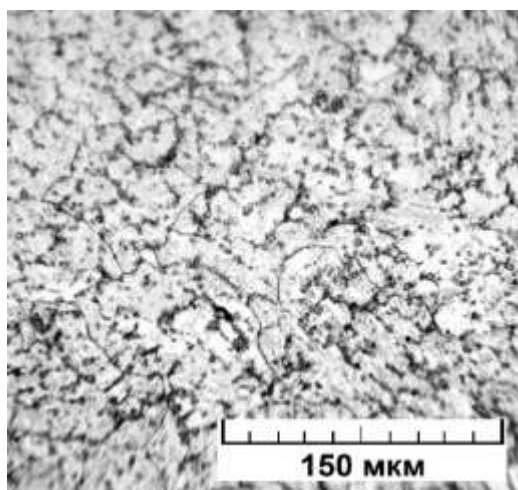
*a**б**в*

Рисунок 3.11 – Шлиф однослойной наплавки: общий вид – *a*; переходная зона – *б*; наплавленный металл – *в*

Металл наплавленный в 3 слоя имеет структуру без видимых границ между слоями (рисунок 3.12). Толщина покрытия составляет 3,95 мм. Наплавка характеризуется отсутствием крупных пор и несплошностей.

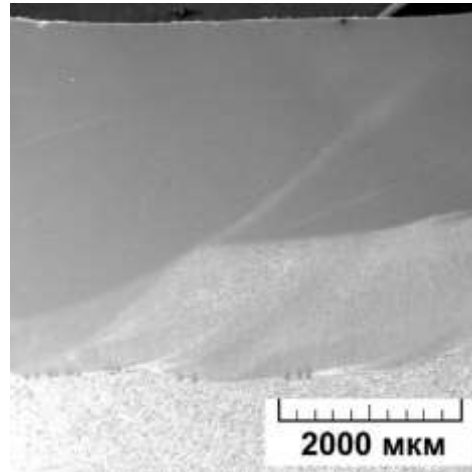


Рисунок 3.12 – Макрошлиф трехслойной наплавки

По толщине покрытия выявляются два участка с различной структурой. Участок 1, представляющий поверхностную часть наплавленного слоя, имеет крупнозернистую структуру и состоит из легированного мартенсита с выделившимися по границам зерен дисперсными частицами упрочняющих фаз (рисунок 3.13, а). Очевидно, что данный участок представляет собой два поверхностных слоя наплавленного металла. Участок 2 сильнее подвержен действию травителя, чем участок 1, что связано с большей долей участия основного металла в процессе сплавления. Данный участок имеет зеренную структуру с зерном различного размера (рисунок 3.13, б) что, вероятно, обусловлено многократным нагревом данного участка в процессе трехслойной наплавки. Необходимо отметить, что участок имеет неравномерную толщину, которая меняется от 0,6 до 1,6 мм. На границе сплавления с основным металлом наблюдается плотная переходная зона толщиной 5 мкм (рисунок 3.13, в).

Рентгеноструктурный анализ полученных покрытий до и после оплавления подтверждает результаты металлографии, что металлическая матрица всех типов покрытий состоит преимущественно из мартенсита. Единственной надежно регистрируемой фазой всех покрытий является твердый раствор на основе  $\alpha$ -железа. Других фаз на дифрактограммах не выявлено, вероятно, вследствие их малого количества в покрытиях.

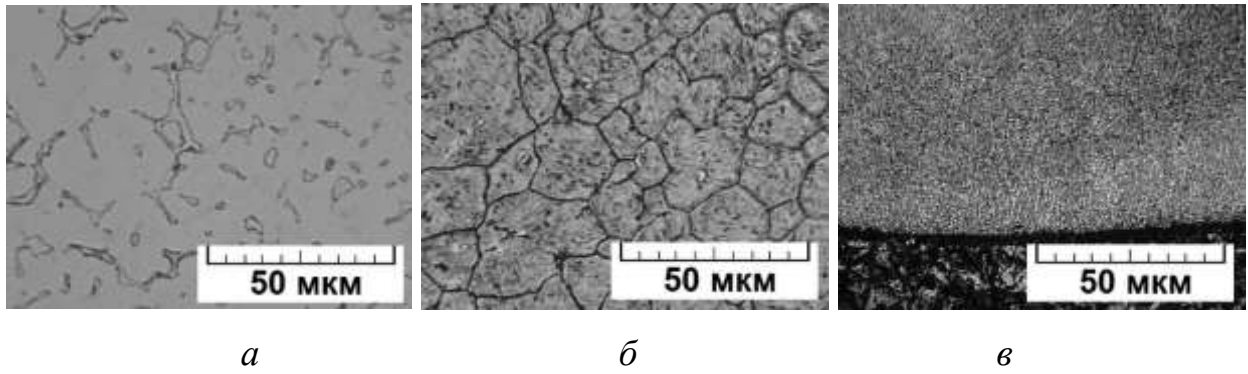


Рисунок 3.13 – Микроструктура металла, наплавленного в 2 слоя: участок 1 – *а*; участок 2 – *б*; переходная зона – *в*

По результатам микрохимического анализа, видно, что все химические элементы по толщине напыленного покрытия распределены неравномерно (рисунок 3.14), что свидетельствует о наличии сложного фазового состава покрытия. На основании приведенных данных можно утверждать, что основной фазой покрытия является твердый раствор легирующих элементов на основе Fe, в котором неравномерно распределены оксиды преимущественно типа  $(Al, Ti)_2O_3$ , о чем свидетельствует повышение концентрации Al и Ti в местах повышенного содержания кислорода. В подложке вблизи с покрытием наблюдается повышенное содержание кислорода и алюминия, что свидетельствует об активной диффузии данных элементов из покрытия в подложку.

На графике распределения элементов покрытия после плазменного оплавления (рисунок 3.15), видно, что все химические элементы по толщине покрытия распределены практически равномерно, что свидетельствует о том, что основной фазой покрытия является твердый раствор легирующих элементов, главным образом, хрома, в железе. Следует также отметить, что в покрытии после оплавления отсутствуют O, Al и Ti. Микрохимический анализ темных включений, обнаруженных в покрытии после оплавления (рисунок 3.9, *а*), показал полное соответствие концентрации легирующих элементов с основным металлом покрытия, что говорит о том, что это микропустоты.

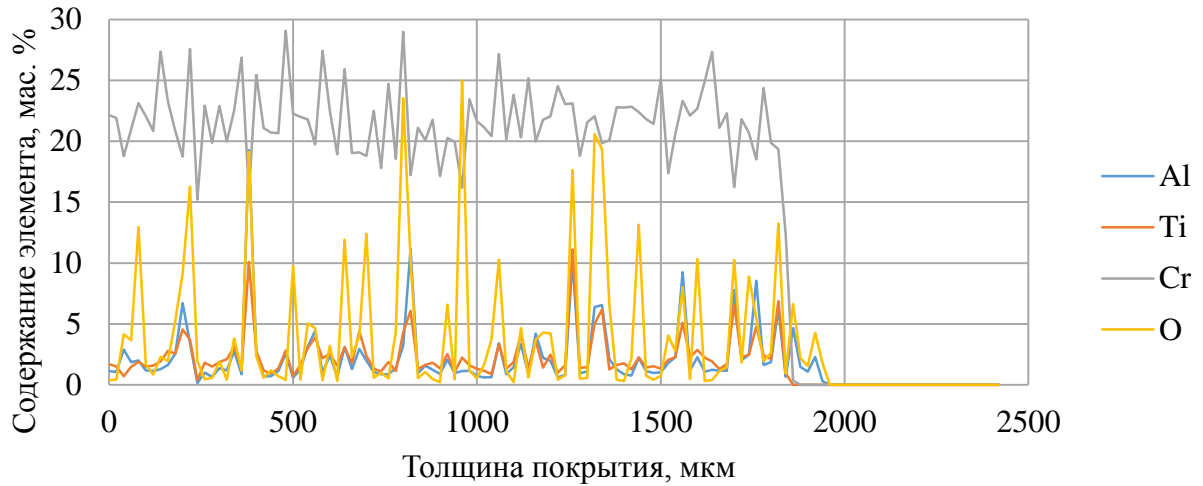


Рисунок 3.14 – Распределение химических элементов по толщине напыленного АДМ покрытия

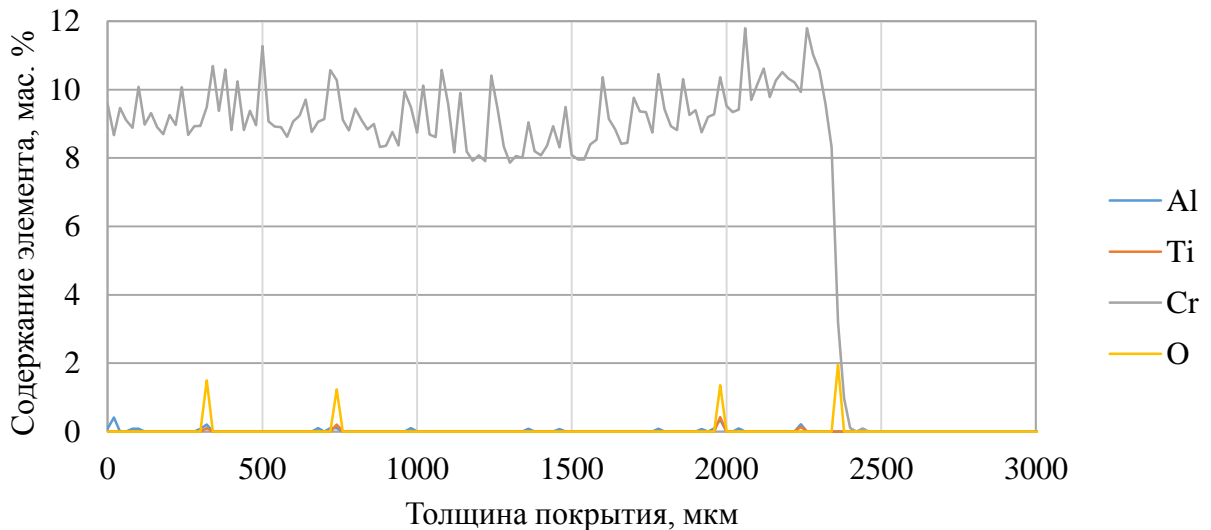


Рисунок 3.15 – Распределение химических элементов по толщине напыленного АДМ покрытия после плазменного оплавления

Наплавка рассматриваемой порошковой проволокой приводит к получению металла с равномерным распределением легирующих элементов по толщине слоя (рисунок 3.16), что подтверждает данные о фазовом составе, полученные методом рентгеноструктурного анализа. Основной фазой покрытия является легированный мартенсит. В металлической матрице в небольшом

количестве распределены дисперсные карбиды Cr и Ti, выделившиеся по границам зерен. Кислород в наплавленном металле отсутствует.

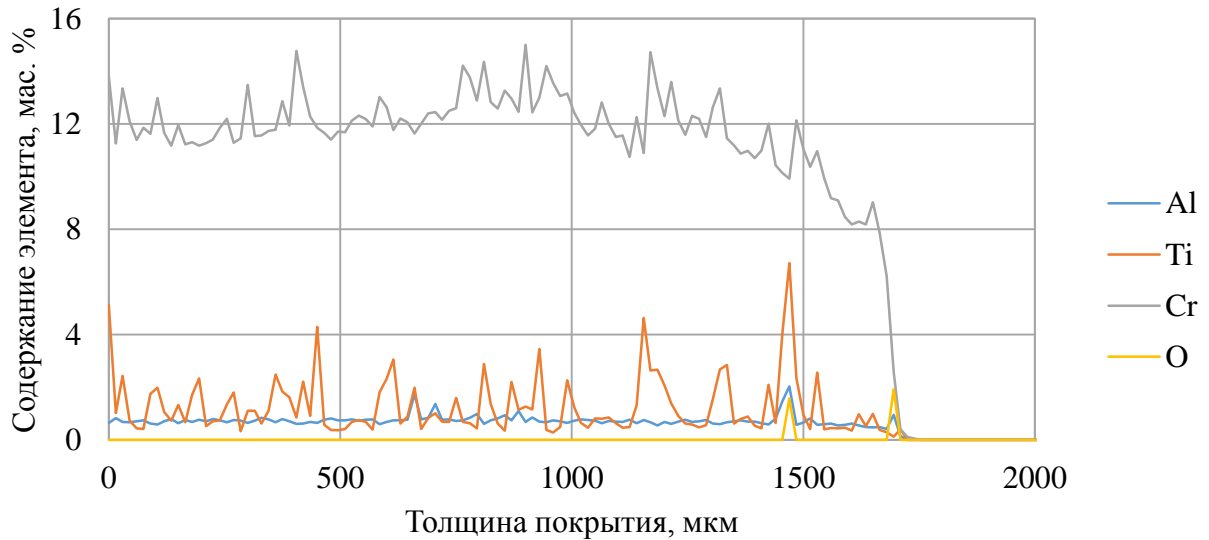


Рисунок 3.16 – Распределение химических элементов по толщине наплавленного слоя

Химические элементы по толщине трехслойной наплавки распределены неравномерно (рисунок 3.17). В соответствии с распределением элементов можно по толщине покрытия выделить две области: верхняя (зона 1), вероятно, соответствует второму и третьему наплавленным слоям и характеризуется наибольшим содержанием легирующих элементов. Легирующие элементы, в основном, находятся в твердом растворе на основе железа. Далее, ближе к основе, наблюдается резкое снижение концентрации легирующих элементов (зона 2). Очевидно, что зона 2 представляет собой первый наплавленный слой, низкая концентрация элементов в котором, объясняется сильным смешением с основным металлом. На основании приведенных данных можно утверждать, что основной фазой покрытия является легированный мартенсит, в котором распределены дисперсные карбиды Ti и Cr.

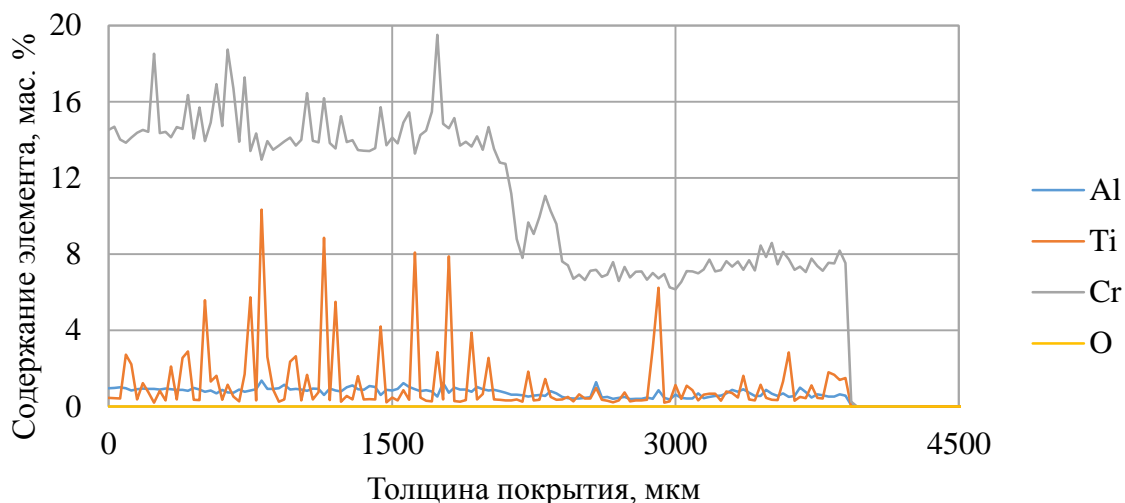


Рисунок 3.17 – Распределение химических элементов по толщине трехслойной наплавки

Результаты микрохимического анализа подтверждаются результатами спектрального анализа с поверхности образцов (таблица 3.4). Видно, что в процессе напыления практически не происходит выгорания легирующих элементов. Самое высокое содержание легирующих элементов наблюдается в напыленном покрытии. Содержание легирующих элементов в наплавленном слое в среднем в 2 раза меньше, чем в напыленном, что объясняется частичным выгоранием элементов и смешением с основным металлом, в процессе наплавки. Выполнение наплавки в 3 слоя позволяет существенно сократить потери легирующих элементов, за счет уменьшения доли участия основного металла. Наименьшее содержание легирующих элементов наблюдается в напыленном покрытии после плазменного оплавления. Плазменное оплавление привело к полному исчезновению алюминия и титана, а также к сокращению содержания Cr и C в 2 раза. Такое резкое снижение концентрации легирующих элементов после плазменного оплавления объясняется несколькими процессами. Присутствующие в напыленном покрытии оксиды Ti и Al, вследствие их нерастворимости в расплавленном металле, в процессе плазменного оплавления всплывают в шлак. Карбиды титана, а также Ti и Al, растворенные в металлической матрице покрытия, так же окисляются при взаимодействии с

кислородом из пор и оксидов и уходят в шлак. Основными причинами снижения концентрации С и Cr вероятно являются – смешение с основным металлом и выгорание, что подтверждается химическим анализом однослойной наплавки (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Химический состав покрытий

Тип покрытия	Содержание элемента, % масс.			
	С	Cr	Al	Ti
АДМ покрытие	0,77	20,04	2,18	1,56
Оплавленное покрытие	0,37	8,91	0,01	0,01
Наплавка в 1 слой	0,50	10,69	0,75	0,99
Наплавка в 3 слоя	0,77	18,62	1,23	1,74

Исходное покрытие, полученное методом АДМ, характеризуется значительной неравномерностью распределения микротвердости по толщине покрытия, что свидетельствует о наличии пор, несплошностей, структурных и фазовых неоднородностей (рисунок 3.18). Значения микротвердости меняются в пределах от 200 до 650 HV<sub>0,3</sub>.

Плазменная обработка покрытия привела к его переплавлению и существенному изменению структуры и микротвердости (рисунок 3.18). Микротвердость покрытия значительно возросла до 800 HV<sub>0,3</sub>. При этом отмечается ее более равномерное распределение по толщине покрытия, что обусловлено однородной структурой покрытия, отсутствием оксидных прослоек, пористости и несплошностей, а также равномерным распределением химических элементов в покрытии с образованием дисперсных упрочняющих фаз.

Однако, при снижении нагрузки на индентор наблюдается повышение среднего значения микротвердости от 753 HV<sub>0,3</sub> до 831 HV<sub>0,05</sub> (рисунок 3.19). Это объясняется наличием, рассмотренных ранее (рисунок 3.9, а), структурных микронеоднородностей в оплавленном покрытии. При повышении нагрузки на индентор, большее число неоднородностей попадает в исследуемую область, что

приводит к снижению среднего уровня твердости. Следовательно, наблюдаемые микронеоднородности имеют твердость ниже, чем основной металл.

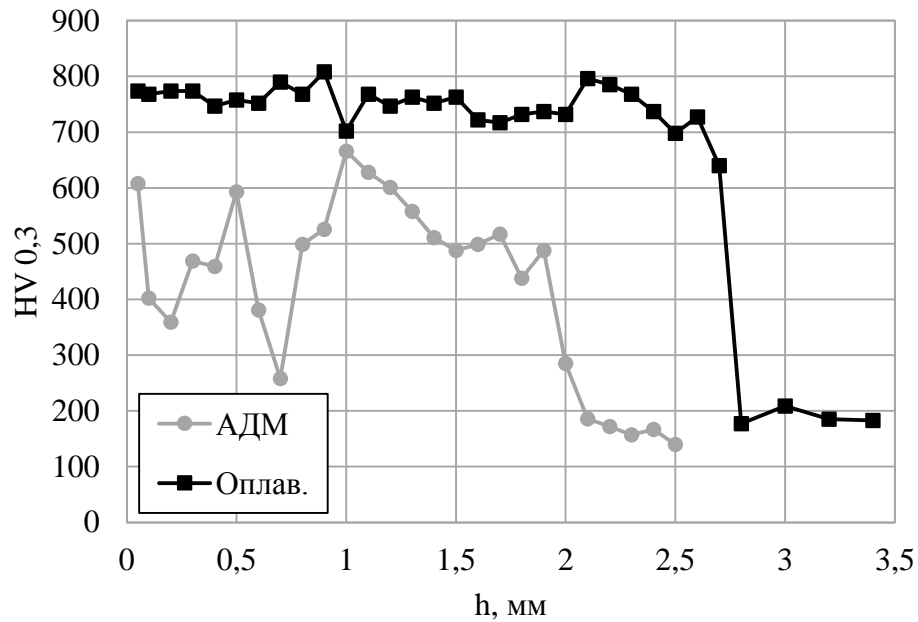


Рисунок 3.18 – Изменение микротвердости по толщине покрытия в исходном и оплавленном состоянии, при нагрузке на индентор 300 гс

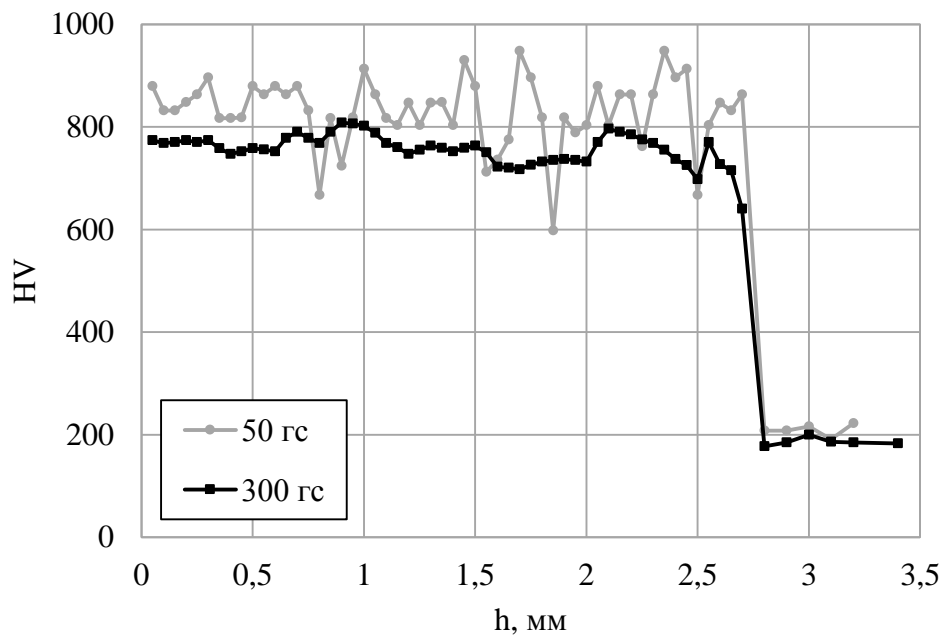


Рисунок 3.19 – Изменение микротвердости по толщине покрытия после плазменной обработки, при нагрузке на индентор 50 гс и 300 гс



Такое значительное повышение твердости, очевидно, связано с образованием плотной мартенситной структуры покрытия. Также можно отметить, что исходя из представленных графиков, плазменная обработка не оказывает влияния на твердость основы.

На рисунках 3.20 и 3.21 представлено изменение микротвердости по толщине покрытия, наплавленного в один и в три слоя, соответственно.

Видно, что однослойная наплавка характеризуется равномерным распределением твердости по толщине покрытия (рисунок 3.20). При переходе к основному металлу, который характеризуется значительно более низкой твердостью, микротвердость резко уменьшается, так как не наблюдается переходной зоны между покрытием и подложкой. Смена нагрузки на индентор особого влияния на распределение твердости не оказывает, что говорит о равномерном распределении структурных составляющих по толщине наплавки.

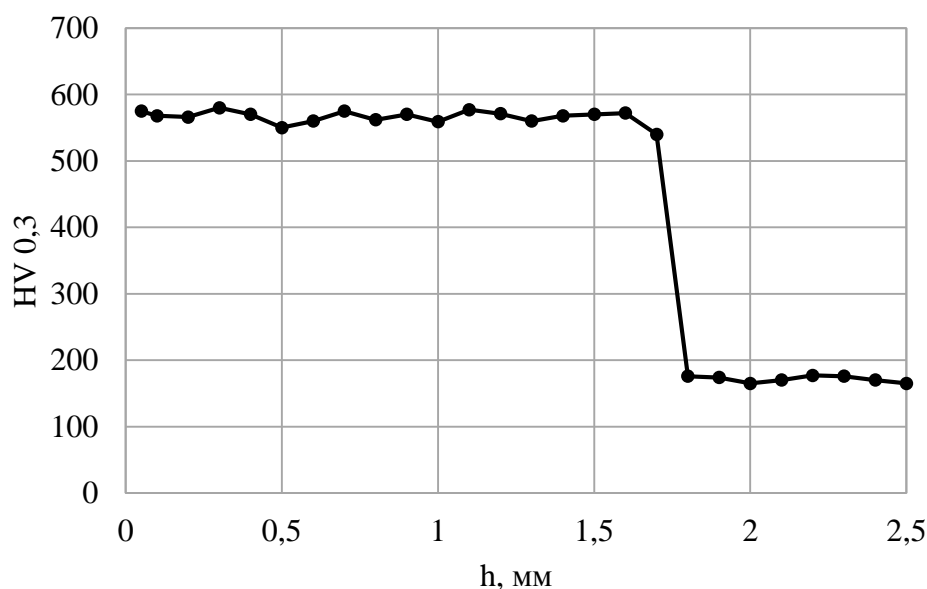


Рисунок 3.20 – Изменение микротвердости по толщине однослойной наплавки при нагрузке на индентор 300 гс

Измерение микротвердости трехслойной наплавки, при различной нагрузке на индентор, в обоих случаях показывает неравномерное распределение

твердости по толщине покрытия (рисунок 3.21), что обусловлено изменением микроструктуры при многочисленном нагреве в процессе наплавки.

По структуре в покрытии выделяется две различные зоны (рисунок 3.13). Зона 1 (рисунок 3.13, а), занимающая большую часть по толщине покрытия, имеет среднюю микротвердость – 470 HV<sub>0,3</sub> (рисунок 3.21, Зона 1).

Зона 2, вследствие многократного нагрева в процессе наплавки, отличается по структуре и степени травимости (рисунок 3.13, б). Она характеризуется несколько более высокой микротвердостью – 565 HV<sub>0,3</sub> по сравнению с зоной 1 (рисунок 3.21, зона 2).

Зона 3 (темная полоса на рисунке 3.13, в) является переходной зоной от покрытия к основному металлу и имеет промежуточный уровень твердости 400 HV<sub>0,05</sub> (рисунок 3.21, зона 3).

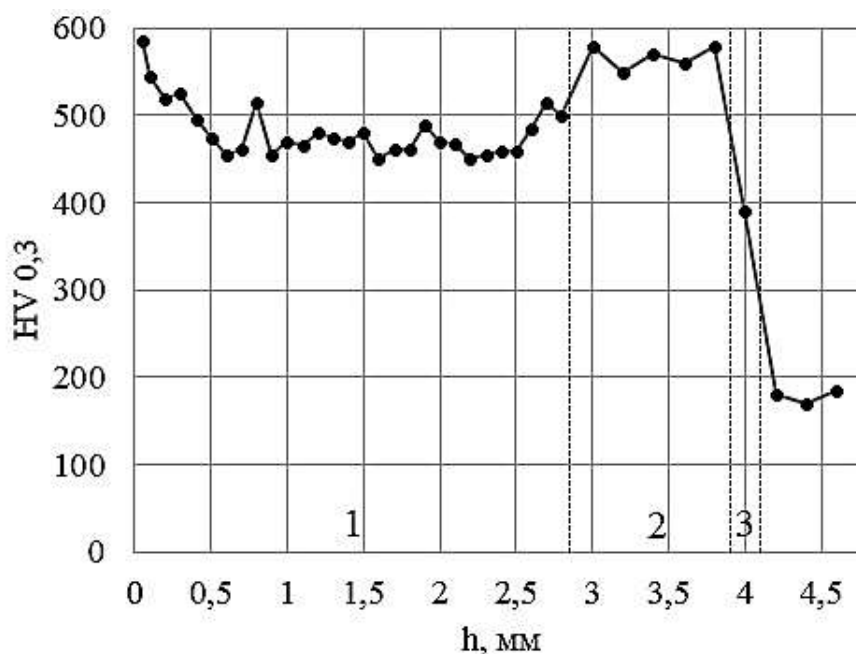


Рисунок 3.21 – Изменение микротвердости по толщине трехслойной наплавки при нагрузке на индентор 300 гс: 1 – Зона 1; 2 – Зона 2; 3 – Зона 3

В таблице 3.5 приведены результаты определения среднего уровня микротвердости всех видов покрытий.

Таблица 3.5 – Средняя микротвердость покрытий

Тип покрытия	Микротвердость	
	HV0,05	HV0,3
АДМ покрытие	460±64	487±50
АДМ покрытие после плазменного оплавления	831±18	753±14
Наплавка в 1 слой	576±18	571±11
Наплавка в 3 слоя	532±19	502±26

Из таблицы 3.5 следует, что наиболее высоким уровнем микротвердости, несмотря на низкое содержание легирующих элементов, характеризуется напыленное АДМ покрытие после плазменной обработки, а наименьшим – исходное покрытие. Плазменная обработка, привела к переплавлению данного покрытия, способствовала устранению пористости и оксидных фаз, имеющих в исходном напыленном покрытии, и обеспечила более равномерное распределение химических элементов и структурных составляющих в покрытии. Наличие в оплавленном покрытии почти 9 % Cr и 0,4 % C, а также высокие скорости охлаждения при плазменной обработке, обуславливают образование структуры среднеуглеродистого мартенсита с включениями дисперсных карбидов хрома. Эти факторы привели к значительному повышению твердости напыленного методом АДМ покрытия.

Несмотря на более высокое содержание легирующих элементов в наплавленных слоях, они обладают наименьшей твердостью, вероятно, это связано с высоким содержанием карбидообразующих элементов Ti и Cr. В процессе наплавки происходит активное образование карбидов, что приводит к обеднению углеродом образующегося мартенсита и, следовательно, к уменьшению его твердости. Наличие в наплавленном металле ферритизаторов – Cr и Al и низкого содержания углерода обуславливают наличие феррита, обладающего низкой твердостью. Таким образом, наплавленный металл обладает ферритно-мартенситной структурой с включениями карбидов Ti и Cr, что объясняет низкие значения твердости полученных наплавов.

По результатам определения потерь массы образцов после испытаний износостойкости по закрепленному абразиву (рисунок 3.22) наибольшую износостойкость имеет покрытие после плазменного оплавления (0,1444 г), а наименьшую – исходное металлизационное покрытие (0,3738 г), при этом износостойкость оплавленного покрытия на 85 % выше износостойкости однослойной наплавки (0,2660 г) и в 2 раза выше износостойкости трехслойной наплавки (0,3132 г).

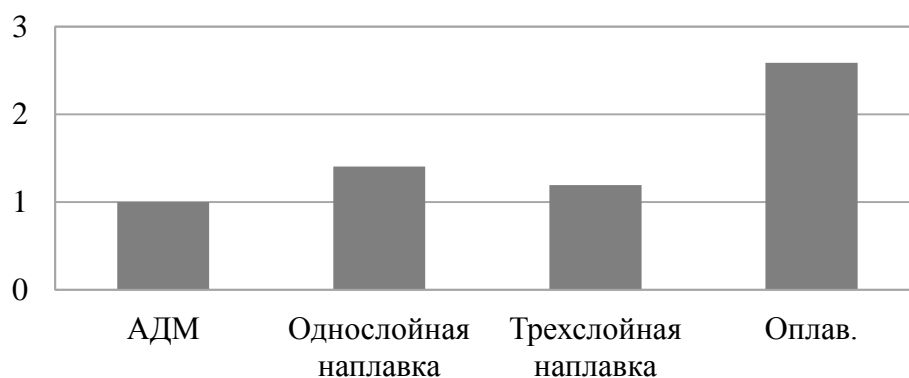


Рисунок 3.22 – Относительная износостойкость различных видов покрытий при изнашивании по закрепленному абразиву

В условиях абразивного износа высокая износостойкость более однородных оплавленных покрытий с равномерным распределением дисперсных упрочняющих фаз в сравнении с металлизационными покрытиями до оплавления может быть связана с ускоренным микрорезанием последних при попадании абразивных частиц в относительно мягкие пограничные слои и поры [1].

В то же время, при однослойной наплавке образуется ферритно-мартенситная структура с выделением карбидов хрома и титана по границам зерен, обуславливающая снижение твердости и износостойкости покрытия.

Выполнение наплавки в 3 слоя позволяет повысить содержание легирующих элементов в наплавленном слое, однако такая концентрация Cr и Al

интенсифицирует образование феррита что обуславливает снижение износостойкости полученной наплавки.

На рисунке 3.23 представлены снимки поверхностей износа со сканирующего-электронного микроскопа, на которых прослеживаются различия типа разрушения.

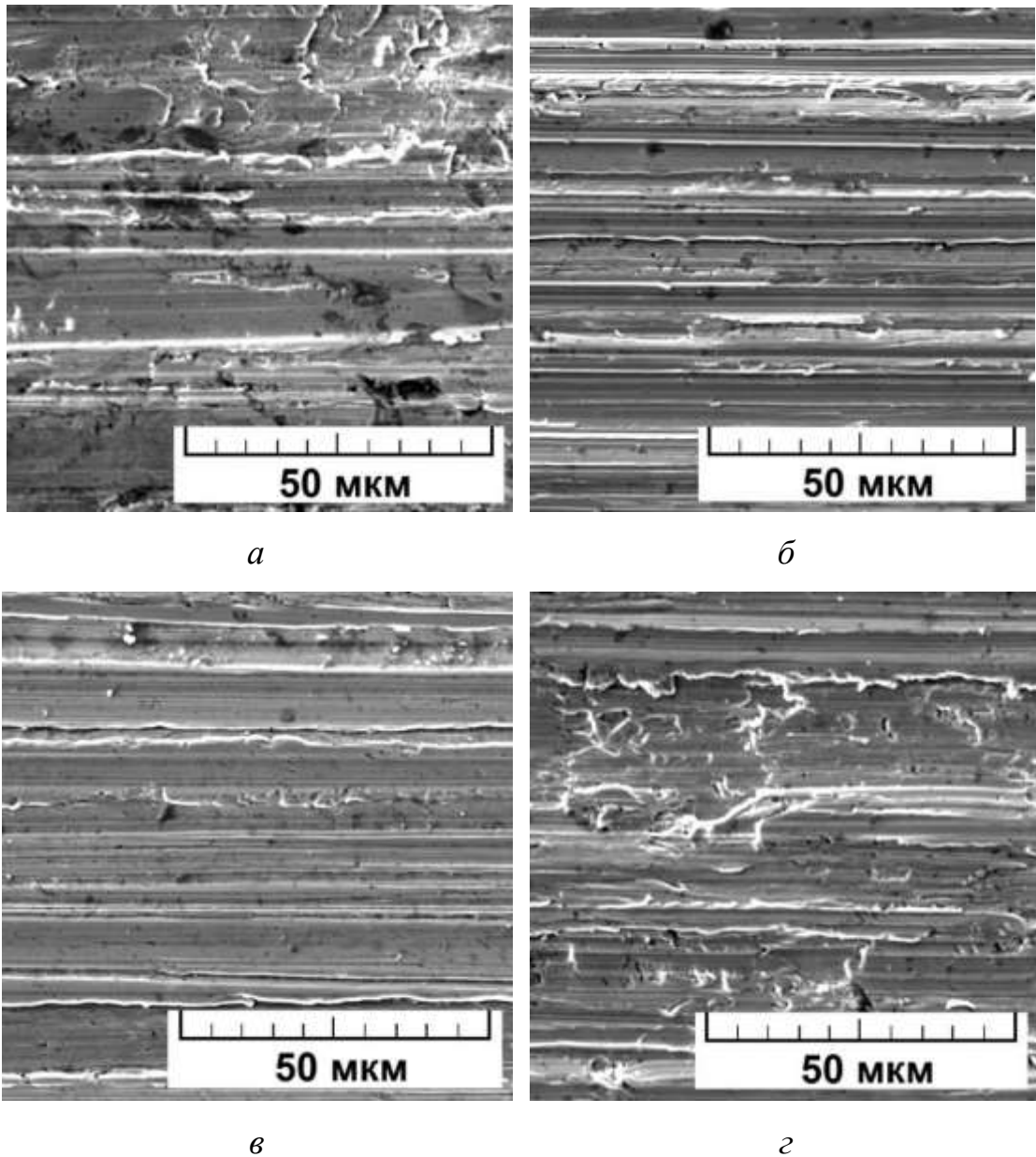


Рисунок 3.23 – Поверхности износа: *а* – напыленное АДМ покрытие; *б* – покрытие после плазменного оплавления; *в* – однослойная наплавка; *г* – трехслойная наплавка

Рисунок 3.23, *а* показывает, что изнашивание напыленного покрытия происходит преимущественно по механизму царапания (пластического оттеснения). Об этом свидетельствует присутствие на поверхностях рассматриваемых покрытий наряду с отдельными однонаправленными впадинами и выступами, связанными с отделением микростружки, выглаженных участков, следов передеформирования металла и большого количества усталостных микротрещин, связанных с развитием малоциклового фрикционной усталости. Помимо глубоких царапин наблюдается, также, отслоение фрагментов покрытия, что говорит о их низкой когезионной прочности, связанной с образованием оксидных прослоек на межламельных границах. Таким образом, абразивное изнашивание покрытия, полученного методом АДМ, происходит по смешанному механизму при преобладающей роли царапания.

Изнашивание напыленного покрытия с последующим плазменным оплавлением, и наплавленного в 1 слой металла, происходит по механизму микрорезания, реализующегося в процессе одноактного отделения микрообъема металла от поверхности покрытия под воздействием абразивного зерна. На это указывает наличие на поверхностях изнашивания обоих покрытий характерных следов микрорезания в виде борозд и отвалов с острыми краями, ориентированных в направлении движения абразивных зерен (рисунок 3.23 *б, в*). Развитие механизма микрорезания свидетельствует о том, что твердость использованного абразива более чем в 1,3 раза превышает твердость структурных составляющих оплавленного покрытия, и наплавленного слоя.

Анализ рисунка 3.23, *г* показывает, что при разрушении металла, наплавленного в 3 слоя, под воздействием абразива также наблюдается смешанный механизм изнашивания, поскольку на поверхностях трения присутствуют как характерные признаки микрорезания, так и выглаженные участки с усталостными микротрещинами. Однако в отличие от смешанного механизма изнашивания напыленного покрытия, характерно преобладание механизма микрорезания.

### 3.4. Выводы по главе

1. Установлено, что оплавленное покрытие состоит из четырёх основных характерных зон, располагающихся от основного металла к поверхности оплавления. Зона, примыкающая к основной стали, толщиной 50–150 мкм, состоит из мелких равноосных зерен 8–9 балла, над ней располагается зона толщиной до 50–100 мкм более крупных равноосных зерен 6–7 балла пакетного мартенсита, содержащего выделения дисперсных карбидов. Указанные зоны переходят в основной слой толщиной 1500–2000 мкм дендритных зерен, длиной 300–500 мкм и шириной 30–60 мкм, состоящих из пакетного мартенсита, окруженного тонкой оболочкой карбидной эвтектики и верхней части переплавленного покрытия, толщиной до 500 мкм, состоящей из равноосных зёрен размером 20–50 мкм. Строение указанных зон объясняется особенностями теплоотвода от расплавленного покрытия в основу с большим коэффициентом теплопроводности.

2. Показано, что образование плотной структуры мелкодисперсного мартенсита с карбидным упрочнением и равномерное распределение легирующих элементов при оплавлении покрытия системы Fe-Cr-C-Ti-Al приводит к повышению его микротвердости в 1,5 раза в сравнении с металлизационным покрытием до оплавления, имеющим неоднородную структуру мартенсита. Пониженная микротвердость наплавленных слоев обуславливается образованием ячеистой ферритно-мартенситной структуры, образовавшейся за счет обеднения углеродом металлической матрицы, при образовании большого количества карбидных фаз.

3. Износостойкость оплавленных покрытий в 2,5 раза выше, чем у металлизационных покрытий до оплавления и в 1,4 раза выше износостойкости наплавленных слоев. Вероятно, это связано со смешанным механизмом износа металлизационного покрытия, характеризующегося механизмами царапания и отслоения участков покрытия с низкой когезионной прочностью при попадании абразивных частиц в пограничные слои и поры покрытия. Значительный износ

наплавленного металла вероятно связан с образованием ферритно-мартенситной структуры, обладающего низкой твердостью.



#### 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

На основе полученных результатов разрабатывали технологические основы плазменного оплавления металлизационных покрытий для повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин. Для подтверждения экспериментальных данных по износостойкости оплавленных плазмой металлизационных покрытий проведены сравнительные эксплуатационные испытания лемехов, упрочненных по предложенной технологии.

##### 4.1. Описание конструкции и упрочняемого рабочего органа

В качестве рабочих органов почвообрабатывающих машин для упрочнения были выбраны лемеха РЗЗ П.702Б из стали 65Г (рисунок 4.1) плуга четырёхкорпусного навесного ПЛН-4-35 (рисунок 4.2). Выбор обусловлен массовым использованием рабочего органа.

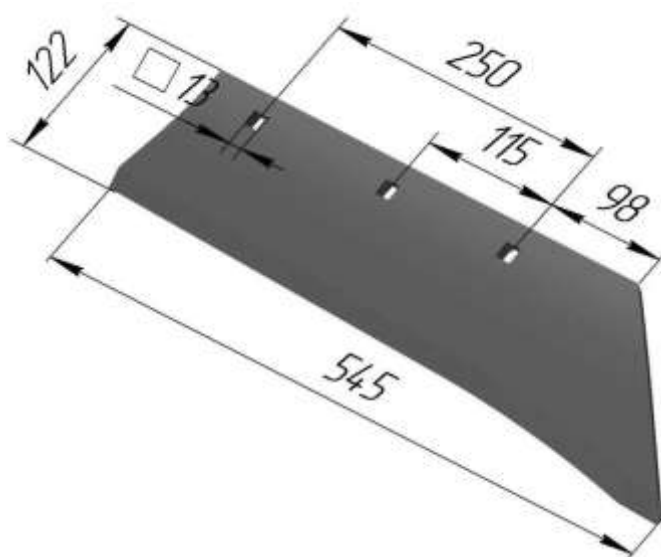


Рисунок 4.1 – Лемех плуга

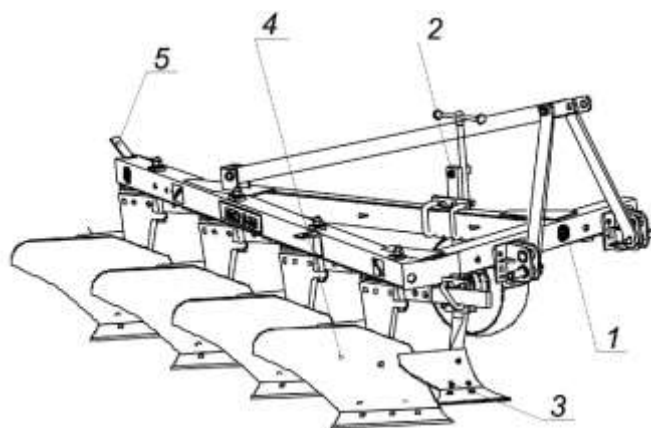


Рисунок 4.2 – Плуг четырех корпусный навесной ПЛН-4-35: 1 – рама; 2 – механизм колеса; 3 – предплужник; 4 – корпус; 5 – световозвращатель

Плуг предназначен для пахоты на глубину до 30 см под зерновые и технические культуры различных почв, не засоренных камнями, плитняком и другими препятствиями, с удельным сопротивлением до 0,09 МПа и твердостью до 3,0 МПа [111].

Для выполнения основной технологической операции – подрезания, оборота и крошения пласта предназначен корпус плуга. Корпус (рисунок 4.3) состоит из башмака, стойки, груди отвала, крыла отвала, полевой доски и лемеха. К стойке корпуса крепится башмак, на котором устанавливается лемех, грудь отвала, крыло отвала, полевая доска. Полевая доска воспринимает боковое усилие, действующее на корпус плуга в горизонтальной плоскости, тем самым устраняет разворот его и улучшает устойчивость хода по ширине захвата.

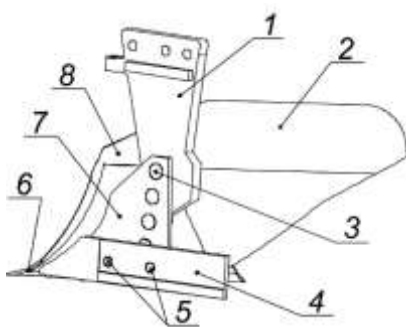


Рисунок 4.3 – Корпус: 1 – стойка; 2 – крыло отвала; 3 – болт; 4 – доска полевая; 5 – болт с шайбой и гайкой; 6 – лемех; 7 – башмак; 8 – грудь отвала

Лемех является основным рабочим органом корпуса плуга и служит для подрезания пласта и направления его на отвал. Ресурс лемеха в первую очередь определяет технический уровень плуга. В горизонтальной плоскости в зоне лемеха наибольшие давления сосредоточены у носка, а на лезвийной части они меньше. В вертикальной плоскости максимальные давления сосредоточены вблизи режущей части лезвия лемеха.

Типичный характер износа серийных лемехов показан на рисунке 4.4 [112].

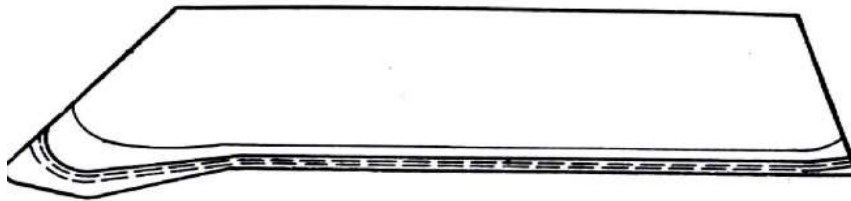


Рисунок 4.4 – Контур износа лемеха

Поэтому к лемеху предъявляются особые требования с точки зрения его конструкции, режимов термообработки и вида упрочняющей технологии, как при изготовлении, так и восстановлении. Применяемый материал должен быть износостойким, обладать высокой ударной вязкостью, поскольку лемех в процессе эксплуатации испытывает значительные динамические нагрузки со стороны абразивной среды.

#### **4.2. Разработка технологии упрочнения**

Рабочие органы почвообрабатывающих машин (лемешные плуги и их элементы: лемеха, грудь и крыло отвала и т.д.) работают в условиях абразивного износа, ударных нагрузок и воздействия агрессивной среды. Их упрочнение заключается в увеличении износостойкости функциональных рабочих поверхностей. Разработанный технологический процесс упрочнения режущей

кромки лезвия лемеха Р33 П.702Б плуга четырёхкорпусного навесного ПЛН-4-35 приведен в таблице 4.1 (Приложение В).

Выполнение работ и изготовление оснастки, необходимой для нанесения металлизационных покрытий осуществлялось совместно с ЗАО НПП «Машпром». Лемех с нанесенным металлизационным покрытием (рисунок 4.5) оплавливали плазмой на универсальной установке для плазменной обработки.



а



б

Рисунок 4.5 – Напыленный лемех: до – а и после плазменного оплавления – б

Таблица 4.1 – Технологический процесс упрочнения лемеха

Наименование, содержание операции	Оборудование, инструмент	Особые указания
<b>Очистная</b>		
1. Очистить деталь от загрязнения погружением последовательно в раствор моющего средства «Лабомид-203» концентрацией 20 г/л	Установка мойки МД-2.	Работы по подготовке поверхности и напылению покрытия осуществлять при температуре воздуха не

<p>при температуре 90–95 °С, затем в «Лабомид-10» концентрацией 20 г/л при температуре 80 °С.</p> <p>2. Продуть деталь сжатым воздухом.</p>		<p>ниже плюс 5°С по ГОСТ 9.304-87.</p>
<b>Дефектовочная</b>		
<p>1. Выполнить дефектацию лемеха по геометрическим размерам.</p>	<p>Поверочная плита 2–2-1000х630 мм;</p> <p>пластинчатый щуп 3–2;</p> <p>штангенциркуль ЩЦ-I-125–0,1;</p> <p>универсальный шаблон сварщика УШС-2</p>	<p>Допускается коробление лезвия лемеха до 4, а его спинки – до 2 мм.</p> <p>Пластинчатый щуп 3-2.</p> <p>Ширина лемеха должна быть не менее 92 мм.</p> <p>Штангенциркуль ЩЦ-I-125–0,1. Толщина режущей кромки лезвия лемеха не должна превышать 1 мм на расстоянии 0,5 мм от режущей кромки.</p> <p>Штангенциркуль ЩЦ-I-125-0,1. Угол заточки лезвия лемеха должен быть 25...30°.</p> <p>Универсальный шаблон сварщика УШС-2.</p>
<b>Дробеструйная</b>		
<p>1. Произвести дробеструйную обработку поверхности лемеха шириной 25-30 мм со стороны лезвия и участок 55-65 мм у носка до получения шероховатости не менее Ra 12.5.</p> <p>2. Контролировать качество операции по эталону.</p>	<p>Камера дробеструйной поверхностной обработки STB-1200, дробь ДЧК 1, давление воздуха 0,6 МПа, угол атаки 70...90°, диаметр сопла 8 мм, дистанция 150 мм, эталон шероховатости Elcometer 125 Shot.</p>	<p>1. Сжатый воздух, применяемый для подготовки поверхности, должен быть очищен от масла и влаги и соответствовать классам 0, 1, 3, 5 по ГОСТ 17433.</p> <p>Дробь по ГОСТ 11964-81</p> <p>Эталон шероховатости по ISO 8503-1.</p> <p>2. Шероховатость поверхности не менее Ra 12.5 в соответствии с ГОСТ 9.304-87, 28302-89.</p>

<b>Слесарная</b>		
1. Установить деталь в токарный станок	Кран консольный с поворотной стрелой  на колонне DEMAG 500, станок токарный 1610.	Закрепить деталь по болтовым отверстиям на оснастке в патрон токарного станка
<b>Напыление</b>		
1. Напылить на поверхность слой толщиной 2-0,2 мм. Операцию выполнить не позднее 2 часов после дробеструйной обработки.	Аппарат АДМ-10, ток 200 А, напряжение 28 В, дистанция напыления 100 мм, скорость перемещения аппарата 360 м/ч, проволока ППМ-8, диаметр 2 мм, давление газов: пропана 0,32 МПа, сжатого воздуха 0,30 МПа.	1. Проволока перед ее применением должна быть расконсервирована в соответствии с требованиями ГОСТ 9.014, обезжирена органическими растворителями в соответствии с требованиями ГОСТ 9.402.  2. Сжатый воздух, применяемый для напыления покрытия, должен быть очищен от масла и влаги и соответствовать классам 0, 1, 3, 5 по ГОСТ 17433,  3. Капли диаметром свыше 0.5 мм не допускаются.  4. Безопасность обеспечивается при выполнении требований по ГОСТ 12.3.008-75; 12.3.016-87; 28302-89
<b>Контрольная</b>		

<p>1. Контролировать внешний вид покрытия визуально.</p> <p>2. Контролировать толщину покрытия с помощью толщиномера.</p>	<p>1. Лупа просмотровая ЛП-1-10х по ГОСТ 257016-83.</p> <p>2. Ультразвуковой толщиномер ТТ100.</p>	<p>1. Недопустимо наличие частиц нерасплавленного металла, трещин, отслоений, вздутий, следов местной коррозии согласно ГОСТ 9.304-87.</p> <p>2. Контролировать толщину не менее чем в 10 местах согласно ГОСТ 9.304-87, относительная погрешность измерения <math>\pm 10\%</math> согласно ГОСТ 27750-88.</p>
<b>Слесарная</b>		
<p>1. Снять деталь с токарного станка, установить в наплавочный станок.</p>	<p>Кран консольный с поворотной стрелой на колонне DEMAG 500, наплавочный станок У-653</p>	
<b>Оплавление</b>		
<p>Произвести оплавление напыленного покрытия</p>	<p>Многоцелевая установка для плазменной обработки, ток 160 А, диаметр сопла 4 мм, скорость перемещения плазмотрона 6 м/ч, дистанция обработки 5 мм, расход плазмообразующего газа 2,5 л/мин, расход защитного газа 4,5 л/мин, шаг между дорожками 4 мм</p>	<p>1. Производить последовательное оплавление с перекрытием дорожек на 40–50 %, до получения сплошного покрытия на всей лезвийной части лемеха.</p>
<b>Контрольная</b>		
<p>1. Контроль качества соединения покрытия с основой.</p>	<p>1. Ультразвуковой дефектоскоп УД2-70.</p>	<p>1. Контроль выполнять по периферии и торцам лемехов.</p> <p>2. Объем УЗК 100 % согласно ГОСТ 14782-86.</p>
<b>Упаковочная</b>		

1. Рабочую поверхность закрыть бумагой. Деталь уложить в тару	Бумага оберточная по ГОСТ 8273-75. Ящики деревянные по ГОСТ 10198-91	
---	--	--

### **4.3. Эксплуатационные испытания упрочненных рабочих органов почвообрабатывающих машин**

Эксплуатационным испытаниям подвергались опытные (упрочненные по разработанной технологии) и серийные лемеха плужного корпуса из стали 65Г, упрочненные по двум технологиям: закалка и ТВЧ наплавка износостойкого сплава Сормайт №1.

Опытные и серийные лемеха установили на плуг четырёхкорпусный навесной ПЛН-4-35 (рисунок 4.6) и агрегатировались с трактором ВТ-150 (150 л.с.). Каждый плуг оснащался полным комплектом опытных или серийных лемехов. Такая схема обеспечивает максимальную точность результатов, при необходимости их сравнения, так как нагрузка на лемеха корпусов уменьшается от первого к последнему.

Испытания проводили на полях СПК (колхоз) имени Калинина Дебесского района, Удмуртской республики (Приложение Г). Показатели условий испытаний определяли по ГОСТ 20915-2011, РД 10.4.1-8У. Обработывали среднесуглинистые почвы при глубине обработки 25 см. Влажность почвы за период испытаний варьировалась за период испытаний в диапазоне 15–30 %. Среднесуточная температура воздуха 16 °С. Скорость движения агрегата составила в среднем 7–9 км/ч.





Рисунок 4.6 – Плуг с установленными опытными лемехами

Первичную техническую экспертизу серийных рабочих органов после объемной закалки, ТВЧ наплавки сормайтотом и опытных с оплавленным плазмой металлизационным покрытием проводили по ОСТ 10.2.1-97 для последующего определения величины износа. Размеры рабочих органов контролировали по параметрам, указанным на рисунке 4.7. Испытания проводили до достижения каждым рабочим органом предельного состояния.

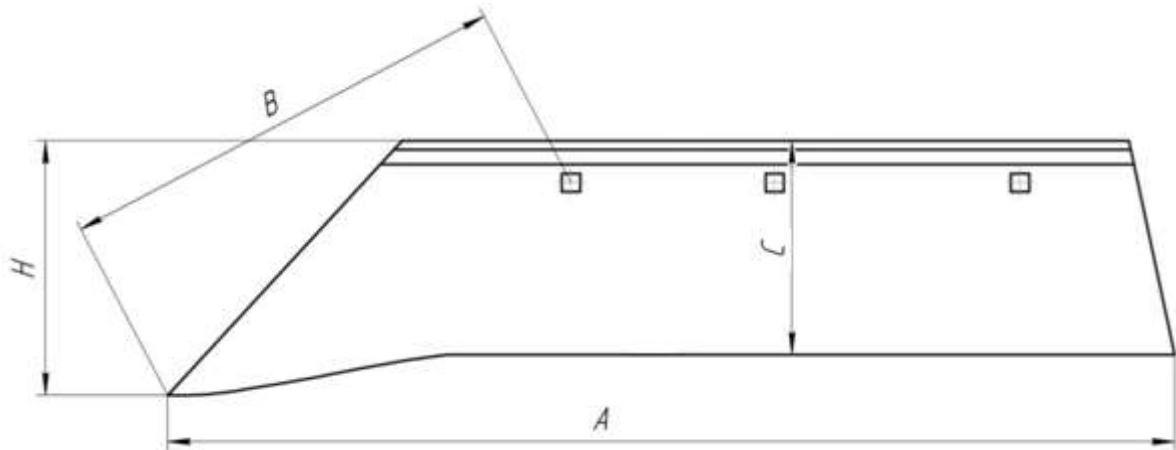


Рисунок 4.7 – Контролируемые параметры лемехов

Параметрами, определяющими текущее состояние рабочего органа, являлась линейный износ носка и лезвийной части, а также потеря массы. Данные параметры контролировали в конце каждой смены, при этом рабочие

органы снимали с машины и очищали от остатков почвы при помощи металлической щетки. Взвешивание выполняли на весах CASED-H-15 с погрешностью измерения массы 0,5 г. Линейный износ измеряли штангенциркулем ШЦ-I-125-0,1 с точностью 0,1 мм. За критерии выбраковки приняты предельный линейный износ по длине носка 52 мм, по ширине лезвийной части 30 мм, предельный массовый износ 850 г.

Эксплуатационные испытания показали, что ресурс серийного лемеха, подвергнутого объемной закалке, при вспашке среднесуглинистых почв составляет до 8–9 га., после чего наступает предельный массовый износ (таблица 4.2). Потери массы одного опытного лемеха при наработке 9,2 га составили 618 г, тогда как потери массы серийного, закаленного лемеха, при той же наработке, составили 919,5 г, а для лемеха с ТВЧ наплавкой износостойкого сплава Сормайт – 823 г. Полная наработка опытного лемеха составила 11,5 га. Таким образом, плазменное оплавление напыленного на лемех металлизационного покрытия системы Fe-C-Cr-Ti-Al позволяет повысить его ресурс на 34 %, в то время как ТВЧ наплавка сормайта только на 12 % (рисунок 4.8).

Таблица 4.2 – Потеря массы лемехов по результатам испытаний

Технология упрочнения	Начальная масса, г	Наработка 0,7 Га / потеря массы, г	Наработка 1,7 Га / потеря массы, г	Наработка 3,2 Га / потеря массы, г	Наработка 9,2 Га / потеря массы, г
Оплавление (опытный)	3904	3844,5 / 59,5	3761 / 143	3633 / 271	3216 / 688
Наплавка (серийный)	4157	4095,5 / 61,5	3992,5 / 164,5	3856 / 301	3334 / 823
Закалка (серийный)	4215,5	4178 / 37,5	4099 / 116,5	3872 / 343,5	3296 / 919,5

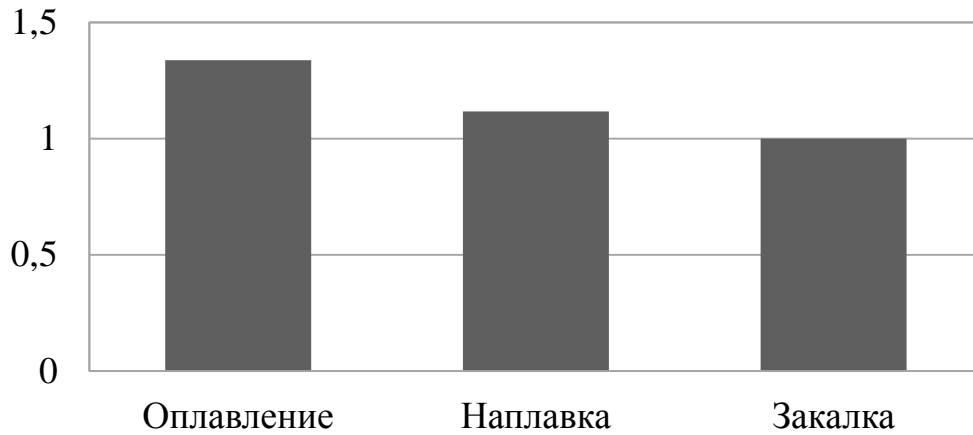


Рисунок 4.8 – Относительная износостойкость лемехов

Интенсивность линейного износа (таблица 4.3) серийного лемеха, подвергнутого объемной закалке, по длине носка составила 4,56 мм/га (рисунок 4.9, *а*), а упрочненного по разработанной технологии 1,95 мм/га (рисунок 4.9, *в*). В тоже время, интенсивность линейного износа серийного лемеха по ширине лезвийной части составила 0,65 мм/га, а упрочненного по разработанной технологии 0,32 мм/га. Максимальный линейный износ рабочих органов наблюдается по длине носка и лезвийной части, следовательно, в процессе эксплуатации максимальным нагрузкам подвержен именно носок лемеха. Можно отметить, что при отбраковке лемехов по причине достижения предельного массового износа ни один из них не достиг предельного линейного износа. С одной стороны, полученные данные коррелируют с величиной массового износа лемехов, а с другой, свидетельствуют о том, что для повышения их износостойкости нет необходимости упрочнять лезвийную часть, достаточно упрочнения носовой части.

Из-за интенсивного изнашивания режущей кромки лезвия серийного лемеха при работе плуга на среднесуглинистой почве его носок затупляется и приобретает округлую форму. Это, в свою очередь, приводит к повышению тягового усилия плуга, нарушению технологического процесса вспашки и, соответственно, к увеличению удельного расхода топлива при снижении производительности работы плуга.

Таблица 4.3 – Изменение контролируемых параметров лемехов по результатам испытаний

Тех-я	Контролируемые параметры (рисунок 4.7), мм											
	А			В			С			Н		
	Нач	Кон	Разн	Нач	Кон	Разн	Нач	Кон	Разн	Нач	Кон	Разн
Оплав.	543	523	20	243	225	18	121	118	3	130	120	10
Наплав.	545	507	38	243	205	38	120	110	10	130	115	15
Закалка	540	503	37	245	203	42	124	118	6	140	116	24

При объемной закалке серийного лемеха из стали 65Г достигается твердость металла до 50 HRC. Но износостойкость таких рабочих органов ниже, по сравнению с аналогичными деталями, изготовленными по разработанной технологии из-за того, что на суглинистых почвах не происходит их самозатачивания. Так, после проведения эксплуатационных испытаний установлено, что угол заточки лезвия серийного лемеха составляет 30–33 ° (рисунок 4.10, а, б), а у лемеха с оплавленным плазмой металлизационным покрытием – 23–25 ° (рисунок 4.10, в, г), при начальном угле заточки 22–25 °.

Эксплуатационные испытания упрочненных лемехов плуга четырёхкорпусного навесного ПЛН-4-35 с оплавленным плазмой металлизационным покрытием, подтвердили результаты лабораторных испытаний и доказали преимущества разработанной технологии повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин.

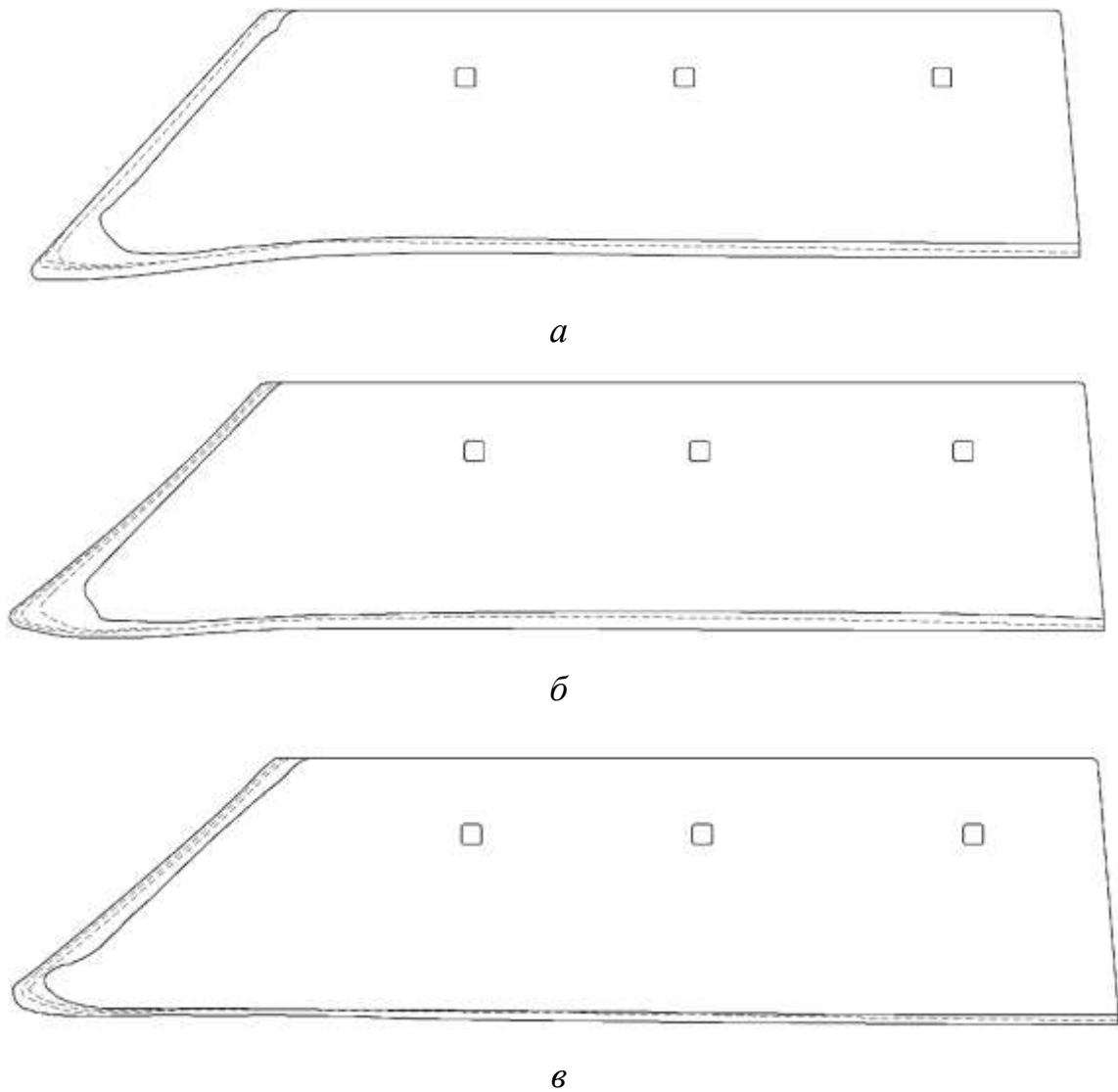


Рисунок 4.9 – Эпюры интенсивности линейного износа носка и лезвийной части лемехов: *a* – серийный; *б* – с наплавкой сплавом Сормайт №1; *в* – упрочненный по разработанной технологии

*a**б**в**г*

Рисунок 4.10 – Угол заточки лезвийной части лемехов по результатам эксплуатационных испытаний: *a, б* – внутренняя и внешняя поверхность серийного лемеха соответственно; *в, г* – внутренняя и внешняя поверхность опытного лемеха соответственно

#### 4.4. Выводы по главе

1. Разработан технологический процесс упрочнения режущей кромки лезвия лемеха плуга путем плазменного оплавления экономнолегированных металлизационных покрытий из ПП системы Fe-Cr-C-Ti-Al.

2. Упрочненные по разработанной технологии лемеха плуга прошли успешные испытания в колхозе имени Калинина Удмуртской республики.

3. По результатам эксплуатационных испытаний установлено, что ресурс упрочненных по разработанной технологии лемехов при обработке суглинистых почв на 34 % выше в сравнении с серийным лемехом из стали 65Г после объемной закалки, и на 12 % в сравнении с лемехом после ТВЧ наплавки сормайта № 1. Отбраковка всех лемехов выполнена по достижению предельного массового износа, при этом остался значительный запас по линейному износу.

4. Установлено, что угол заточки лезвия лемеха с оплавленным плазмой металлизационным покрытием сохранился после эксплуатационных испытаний, что указывает на присутствие эффекта самозатачивания. Сохранение формы носка упрочненного лемеха и его самозатачивание позволяет обеспечить равномерность технологического процесса вспашки, снижение тягового усилия плуга, а также снижение удельного расхода топлива при повышении производительности процесса вспашки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Наличие пор и слоистой структуры металлизационных покрытий приводит к снижению их абразивной износостойкости, а достаточно низкая адгезия покрытия в условиях эксплуатации может привести к отслоению. Показано, что для повышения износостойкости покрытий наиболее эффективно использование последующего плазменного оплавления. Однако, такая обработка металлизационных покрытий на основе железа сдерживается вследствие отсутствия технологических рекомендаций применительно к обработке материалов с низкой теплопроводностью и высокой температурой плавления.

2. Для определения параметров режима обработки разработана математическая модель распространения тепла в двухслойной композиции «металлизационное покрытие – основа», под воздействием плазменного источника нагрева. Анализ результатов расчетов позволил достоверно оценить влияние пористости, состава и толщины покрытия на их теплофизические характеристики, а также, параметров режима плазменной обработки на коэффициент формы проплавления композиции. Необходимые параметры режима плазменной обработки определены по критерию максимального коэффициента формы проплавления подложки, при этом отклонение результатов расчетов по разработанной модели от экспериментальных данных не превышает 20 %.

3. Установлено, что оплавленное покрытие состоит из четырёх основных характерных зон, располагающихся от основного металла к поверхности оплавления. Зона, примыкающая к основной стали, толщиной 50–150 мкм, состоит из мелких равноосных зерен 8–9 балла, над ней располагается зона толщиной до 50–100 мкм более крупных равноосных зерен 6–7 балла пакетного мартенсита, содержащего выделения дисперсных карбидов. Указанные зоны переходят в основной слой толщиной 1500–2000 мкм вытянутых столбчатых зёрен (дендритов), длиной 300–500 мкм и шириной 30–60 мкм, состоящих из пакетного мартенсита, окруженного тонкой оболочкой



карбидной эвтектики и верхней части переплавленного покрытия, толщиной до 500 мкм, состоящей из равноосных зёрен размером 20–50 мкм. Строение указанных зон объясняется особенностями теплоотвода от расплавленного покрытия в основу с большим коэффициентом теплопроводности.

4. Показано, что образование плотной структуры мелкодисперсного мартенсита с карбидным упрочнением и равномерное распределение легирующих элементов при оплавлении покрытия системы Fe-Cr-C-Ti-Al приводит к повышению его микротвердости в 1,5 раза в сравнении с металлизационным покрытием до оплавления, имеющим неоднородную структуру мартенсита. Пониженная микротвердость наплавленных слоев обуславливается образованием ячеистой ферритно-мартенситной структуры, образовавшейся за счет обеднения углеродом металлической матрицы, при образовании большого количества карбидных фаз.

5. Установлено, что износостойкость оплавленных плазмой покрытий Fe-Cr-C-Ti-Al в 2,5 раза выше, чем у металлизационных покрытий до оплавления и в 1,4 раза выше износостойкости слоя, выполненного аргонодуговой наплавкой из той же порошковой проволоки.

6. Установлено, что значительные потери массы образцов с металлизационным покрытием после испытаний связаны со смешанным механизмом износа, характеризующимся механизмами царапания и отслоения участков покрытия с низкой когезионной прочностью при попадании абразивных частиц в пограничные слои и поры покрытия. Пониженная износостойкость наплавленного металла обуславливается образованием ферритно-мартенситной структуры, обладающей более низкой твердостью в сравнении с мартенситной структурой оплавленного покрытия.

7. Разработан технологический процесс упрочнения экономнолегированных металлизационных покрытий системы Fe-Cr-C-Ti-Al путем плазменного оплавления применительно к лемехам плуга.

8. Упрочненные по разработанной технологии лемеха плуга прошли успешные испытания в колхозе имени Калинина Удмуртской республики.

9. По результатам эксплуатационных испытаний установлено, что ресурс упрочненных по разработанной технологии лемехов при обработке суглинистых почв на 34 % выше в сравнении с серийным лемехом из стали 65Г после объемной закалки.

10. Установлено, что угол заточки лезвия лемеха с оплавленным плазмой металлизационным покрытием сохранился после эксплуатационных испытаний, что указывает на присутствие эффекта самозатачивания.

#### **Перспективы дальнейшей разработки темы.**

Использование полученных в диссертационной работе результатов исследований по получению износостойких покрытий, из экономнолегированных материалов, позволит разработать технологические рекомендации по плазменной обработке металлизационных покрытий применительно к деталям аналогичного назначения в таких областях промышленности как горнодобывающая (зубья ковша экскаватора, кузова большегрузных автомобилей), металлургическая (детали шаровых мельниц) и другие.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Хрущов, М.М. Трение, износ и микротвердость материалов. Избранные работы (к 120-летию со дня рождения) / М.М. Хрущов; отв. ред. И.Г. Горячева. – М.: Краснодар, 2012. – 512 с.
2. Елагина, О.Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. Учебное пособие / О. Ю. Елагина – М.: Логос, 2009. – 488 с.
3. Чичинадзе, А.В. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
4. Шпилько, Ю.А. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники / Ю.А. Шпилько, С.М. Баринов. – М.: Наука, 1993. – 185с.
5. Костецкий, Б.И. О роли кислорода при трении скольжения / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, Л.В. Никитин // Машиноведение. 1965. № 6. С. 115–118.
6. Рекомендации по восстановлению лемехов плугов. ВНИИВИД ВНИО «Ремдеталь» // М.: ГОСНИТИ, 1986. – 26 с.
7. Синеоков, Г. П. Теория и расчёт почвообрабатывающих машин / Г. П. Синеоков, И. М. Панов. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.
8. Рабинович, А.Ш. Самозатачивающиеся плужные лемеха и другие почво-режущие детали машин / А.Ш. Рабинович. – М.; БТИ ГОСНИТИ, 1962. 308 с.
9. Бернштейн, Д.Б. Лемехи плугов. Анализ конструкций, условий изнашивания и применения материалов / Бернштейн Д.Б., Лискин И.В. // Сельскохозяйственные машины и орудия. Серия 2. Вып. 3. 1992. С. 35.
10. Лялякин, В.П. Состояние и перспективы упрочнения и восстановления деталей почвообрабатывающих машин сварочно-наплавочными методами / В.П. Лялякин, С.А. Соловьев, В.Ф. Аулов // Труды ГОСНИТИ. 2014. том 115. – С. 96–104.

11. Виноградов, В.И. Исследование работы зубчатых лемехов // Повышение долговечности рабочих деталей почвообрабатывающих машин. – М.: Машгиз, 1960. С. 62–79.
12. Зенин, Б.С. Современные технологии модифицирования поверхности и нанесения покрытий / Б.С. Зенин, Б.Б. Овечкин. – Томск, 2008. 75 с.
13. Василенко, Н. А. Перспективы применения локального упрочнения при изготовлении и восстановлении рабочих органов // Техника АПК Выпуск 1, 2008. С. 29–31.
14. Ткачев, В.Н. Работоспособность деталей машин в условиях абразивного изнашивания / В.Н. Ткачев. – М.: Машиностроение, 1995. 336 с.
15. Белинин, Д.С. Плазменная поверхностная обработка высоколегированных сталей током обратной полярности / Д.С. Белинин, Ю.Д. Щицын // Сварка и диагностика: сборник докладов международного форума, 2015. С. 28–34.
16. Огрызков, Е.П. Эффективность использования лемехов / Е.П. Огрызков, Г.И. Лежнев // Тракторы и сельхозмашины, 1972. № 2. С. 18–20.
17. Виноградов, В.Н. Ударно-абразивный износ буровых долот / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, Г.К. Шрейбер. – М.: Недра, 1975. 167 с.
18. Машков, Ю.К. Трение и модифицирование материалов трибосистем / Ю.К. Машков, К.Н. Полещенко, С.Н. Поворознюк, П.В. Орлов. – М.: Наука, 2000. 280 с.
19. Костецкий, Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. и др. – К.: Техника, 1976. 296 с.
20. Косилов, А.И. Плазменная наплавка деталей порошковыми композициями // Техника в сельском хозяйстве, 1983. № 1. С. 30–32.
21. Подлекарев, Н.Н. Оптимальные технологические режимы плазменной наплавки деталей сельскохозяйственных машин / Н.Н. Подлекарев, Л.Н. Белозерский, И.Д. Алексеенко // Механизация и электрификации сельского хозяйства нечерноземной зоны СССР. 1980. Вып. 23. С. 162–168.

22. Ткачев, В.Н. Индукционная наплавка твердых сплавов / В.Н. Ткачев, Б.М. Фиштейн, Н.В. Казинцев, Д.А. Алдырев. – М.: Машиностроение, 1970. – 182 с.
23. Ли, Р.И. Технологии восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники: учеб. пособие / Р.И. Ли. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2014. – 379 с.
24. Микитянский, В.В. Борьба с коррозией методом высокоскоростного газотермического напыления / В.В. Микитянский, Р. Велес Парра, А.Р. Велес-Пивоваров // Вестник АГТУ, 2006. № 2. – С. 95–101.
25. Хасуи, А. Наплавка и напыление / Хасуи А., Моригаки О. – М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
26. Балдаев, Л.Х. Газотермическое напыление: учеб. пособие. – М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
27. Витязь, П.А. Структура и свойства покрытий из стали 40Х13, полученных с использованием различных методов газотермического напыления / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко и др. // Физическая мезомеханика. 2002. № 5. С. 29–36.
28. Харламов, Ю.А. Газотермическое напыление покрытий и экологичность производства, эксплуатации и ремонта машин // Тяжёлое машиностроение. 2000. № 2. С. 10–13.
29. Коробов, Ю.С. Эффективность применения активированной дуговой металлизации для нанесения защитных покрытий // Сварочное производство. 2005. № 2. С. 47–49.
30. Коробов, Ю.С. Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности / Ю.С. Коробов, В.Н. Бороненков. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. 268 с.
31. Похмурский, В. И. Структура и триботехнические характеристики покрытий, полученных электродуговой металлизацией с использованием порошковой проволоки / В. И. Похмурский, М. М. Студент, В. М. Довгуньк и др. // Автоматическая сварка. 2003. № 8. С. 13–17.

32. Bach, Fr.-W. *Modern Surface Technology* / Fr.-W. Bach, A. Laarmann, T. Wenz., 2006. – 346 pp.
33. Похмурский, В. И. Порошковые проволоки систем FeCrB+Al и FeCrB+Al+C для электродуговой металлизации / В. И. Похмурский, М. М. Студент, В. М. Довгуньк и др. // *Автоматическая сварка*. 2002. № 3. С. 32–35.
34. Korobov, Yu. *Metastable austenite type Core Wire for Arc Spraying - modeling of heat transfer in end face and coating structure analysis* / Yu. Korobov, M. Filippov, A. Belozertsev, S. Neveszin, V. Shymiakov // *Proc. of ITSC 2010, ASM International: Singapore, 2010*.
35. Ример, Г.А. Экономнолегированная порошковая проволока для повышения ресурса эксплуатации плунжеров гидропрессов методом дуговой металлизации / Г.А. Ример, В.С. Верхорубов, С.В. Невежин, Ю.С. Коробов, М.А. Филиппов // *Сборник докладов научно-технической конференции «Сварка и диагностика»*. – Екатеринбург, 2014. – С. 105–111.
36. Филиппов, М.А. *Износостойкие стали для отливок: монография* / М. А. Филиппов, А. А. Филиппенков, Г. Н. Плотников. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. 358 с.
37. Olson, G.V. *mechanism for the strain-induced nucleation of martensitic transformations* / G.V. Olson, M. A. Cohen // *Journal of the Less-Common Metals*, 28 (1972). P. 107–118.
38. Марукович, Е.И. *Износостойкие сплавы* / Е. И. Марукович, М. И. Карпенко. – М.: Машиностроение, 2005. 428 с.
39. Коробов, Ю.С. Кинетика взаимодействия напыляемого материала с кислородом при электродуговой металлизации / Ю.С. Коробов, В.Н. Бороненков // *Сварочное производство*. 2003. № 7. – С. 30–36.
40. Анциферов В.Н. *Порошковая металлургия и напылённые покрытия* / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др. М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
41. Pierre, L. Fauchais. *Thermal Spray Fundamentals. From Powder to Part* / Pierre L. Fauchais, Joachim V.R. Heberlein, Maher I. Boulos, 2014, 1566 p.

42. Бобров, Г.В. Нанесение неорганических покрытий (теория, технология, оборудование) / Г.В. Бобров, А.А. Ильин. – М.: Интермет Инжиниринг. 2004. 624 с.

43. Коробов, Ю.С. Стойкость наплавленных слоёв и напыленных покрытий со структурой метастабильного аустенита против абразивного и адгезионного изнашивания / Ю.С. Коробов, М.А. Филиппов, А.В. Макаров, В.С. Верхорубов, С.В. Невежин, А.М. Кашфуллин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2015. – Т. 17. № 2. – С. 224–230.

44. Утенков, В.М. Исследование триботехнических характеристик перспективных износостойких плазменных покрытий при трении скольжения без смазки / В.М. Утенков, А.Н. Зайцев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 11. – С. 81–89.

45. Винокуров, Г.Г. Состав Структура и свойства газотермических покрытий из порошковых проволок и их влияние на процессы изнашивания при трении скольжения / Г.Г. Винокуров, Н.Ф. Стручков и др. // Физическая мезомеханика, 2007. – № 4. том 10. – С. 97–105.

46. Pokhmurs'ka, H. Effect of the laser fusion of electrometallized coatings of the Fe-Cr-B-Al system on their corrosion resistance / H. Pokhmurs'ka, N. Chervins'ka, M. Student, Kh. Zadorozhna // Materials Science. – Vol. 42. No. 6. 2006. – P. 837–842.

47. Кудинов, В.В. Плазменные покрытия. М.: Наука. 1977, 184 с.

48. Sukhpal, S.C. Role of post treatment in thermal spray coatings / Singh Chatha Sukhpal, S. Sidhu Hazoor, S. Sidhu Buta // National Conference on Advancements and Futuristic Trends in Mechanical and Materials Engineering (Oct. 7–8, 2011).

49. Knuutila, J. Sealing of Thermal Spray Coatings by Impregnation / J. Knuutila, P. Sorsa, T. Mäntylä // Journal of Thermal Spray Technology, Volume 8(2) June 1999. – P. 249–257.

50. Кудинов, В. В. Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшев, В. Е. Белащенко и др. – М.: Наука, 1990. 480 с.

51. Никонов, В.О. Анализ способов упрочнения плазменных покрытий / В.О. Никонов, А.М. Кадырметов, В.И. Посметьев // Воронежский научно-технический вестник. 2014. – № 4 (10). – С. 140–149.
52. Geoffroy Berard. Influence of a Sealing Treatment on the Behavior of Plasma-Sprayed Alumina Coatings Operating in Extreme Environments / Geoffroy Berard, Patrice Brun. // Journal of Thermal Spray Technology. Volume 17(3) September 2008. – P. 410–419.
53. Leivo, E. Wear and Corrosion Properties of Plasma Sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  Coatings Sealed by Aluminum Phosphates / E. Leivo, M. Vippola, P. Sorsa, P. Vuoristo, T. Mäntylä // J. Therm. Spray Technol. Vol 6 (No. 2). 1997. – P. 205–210.
54. Ito, H. Infiltration of Copper into Titanium-Molybdenum Spray Coatings / H. Ito, R. Nakamura, M. Shiroyama // Surf. Eng. Vol 4 (No. 1). 1988. – P. 35–38.
55. Jingjing, Zhang. Effect of Sealing Treatment on Corrosion Resistance of Plasma-Sprayed NiCrAl/ $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -8 wt.% $\text{TiO}_2$  Coating / Jingjing Zhang, Zehua Wang, Pinghua Lin // Journal of Thermal Spray Technology. Volume 20(3) March 2011. P. 508–513.
56. Иваночкин, П.Г. Использование электромеханической обработки для модифицирования поверхностей, нанесённых методом электродуговой металлизации [Электронный ресурс] / П.Г. Иваночкин, Н.А. Мясникова, Д.С. Мантуров, Ф.В. Мясников // Брянская государственная инженерно-технологическая академия. URL: [http://science-bsea.bgita.ru/2014/mashin\\_2014\\_20/ivanochkin\\_isp.htm](http://science-bsea.bgita.ru/2014/mashin_2014_20/ivanochkin_isp.htm)
57. Gil, L. Effect of Post-Heat Treatment on the Corrosion Resistance of NiWCrBSi HVOF Coatings in Chloride Solution / L. Gil, M.A. Prato, M.H. Staia // Journal of Thermal Spray Technology. Volume 11(1) March 2002. – P. 95–99.
58. Клеменов, В.А. Исследование структуры и свойств никелевых порошковых покрытий после оплавления / В.А. Клеменов, В.Е. Панин, В.П. Безбородов и др. // Физика и химия обработки материалов. 1997. № 6. – С. 68–75.
59. Zhang, S.H. Improvement on HVOF sprayed Diamalloy coatings by laser irradiation. Applied physics A (2012) 108. P. 201–209.



60. Геллер, М.А. Исследование тепловых режимов термической обработки газотермических покрытий / М.А. Геллер, Е.В. Кремко, И.Л. Куприянов и др. // ФХОМ. 1986. № 6. – С. 24–27.
61. Chong, Cui. Laser surface remelting of Fe-based alloy coatings deposited by HVOF / Chong Cui, Fuxing Ye, Guirong Song // Surface & Coatings Technology 206 (2012) 2388–2395.
62. Rakhes, M. Improvement of Corrosion Performance of HVOF MMC Coatings by Laser Surface Treatment / M. Rakhes, E. Koroleva, Z. Liu // Surface & Coatings Technology 200 (2010). – P. 531–534.
63. Shi-Hong Zhang. Characterization of microstructure and surface properties of hybrid coatings of WC–CoCr prepared by laser heat treatment and high velocity oxygen fuel spraying / Shi-Hong Zhang, Tong-Yul Cho // Materials characterization 59 (2008). – P. 1412–1418.
64. Балановский, А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. – Иркутск.: Изд-во ИрГТУ. 2006. – 180 с.
65. Соснин, Н.А. Плазменные технологии / Н.А. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский // Сварка, нанесение покрытий, упрочнение. – М.: Машиностроение. 2008. – 406 с.
66. Лещинский, Л.К. Плазменное поверхностное упрочнение / Л.К. Лещинский, С.С. Самоутугин, И.И. Пирч, В.И. Комар. – К.: Техника, 1990. – 109 с.
67. Гуревич, Л.М. Изменение структур и свойств покрытий из самофлюсующихся сплавов полученных при различных режимах оплавления / Л.М. Гуревич, Ю.П. Тыков, С.В. Панков и др. // Известия ВолгГТУ. 2011. – № 5 (5). – С. 47–50.
68. Лащенко, Г.И. Плазменное упрочнение и напыление. – К.: «Екотехнологія». 2003. 64 с.
69. Никитин, М. Д. Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизелей / Никитин М. Д., Кулик А. Я., Захаров Н. И. Л.: Машиностроение, 1977. 168 с.

70. Сидоров, А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. – М.: Машиностроение. 1987. 192 с.
71. Рыкалин, Н.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
72. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
73. Кузнецов, Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
74. Медведев, А.Ю. Расчет температурных полей при сварке и наплавке: учебное электронное издание / А.Ю. Медведев; ГОУ ВПО УГАТУ. Уфа: УГАТУ, 2009. – 144 с.
75. Язовских, В.М. Математическое моделирование и инженерные методы расчета в сварке: в 2 ч. Ч2. Тепловые процессы при сварке и моделирование в пакете MathCad / В.М. Язовских. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 119 с.
76. Власов, В.В. Применение функции Грина к решению инженерных задач теплофизики. Ч. 1 / Власов В.В. М: Изд-во Московского института химического машиностроения, 1972. – 441 с.
77. Язовских, В.М. Построение тепловых моделей при сварке методом функций Грина // Вестник ПГТУ. Сварка. Пермь, 2002. – С. 25–48.
78. Полянин, А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. М.: Физматлит, 2001. – 576 с.
79. Сафонов, Е.Н. Плазменная закалка деталей машин: монография / Е. Н. Сафонов. – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2014. – 116 с.
80. Белинин, Д.С. Особенности структурообразования при плазменной поверхностной закалке на большую глубину изделий из стали 40Х13 / Д.С. Белинин, Ю.Д. Щицын // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т. 14. № 4 (5). 2012. – С. 1202–1205.

81. Христофис, Б.О. Создание алгоритмического сопровождения технологии поверхностной закалки углеродистых сталей для гибких модулей плазменной обработки: дисс. канд. техн. наук: 05.03.06 – Санкт-Петербург, 2003. – 174 с.
82. Балановский, А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. Иркутск. Изд-во ИрГТУ. 2006. 180 с.
83. Коротков, В.А. Восстановление и упрочнение деталей и инструмента плазменными технологиями / В.А. Коротков, А.А. Бердников, И.А. Толстов – Челябинск: Металл, 1993. 144 с.
84. Поляков, С.П. Плотность тока и потока энергии на анодном пятне аргоновой и азотной дуг / С.П. Поляков, П.Ф. Буланый // Теплофизика высоких температур. Т. 21, вып. 2, 1983. – С. 246 – 248.
85. Резников, А.Н. Обработка металлов резанием с плазменным нагревом / А.Н. Резников, М.А. Шатерин, В.С. Кунин, Л.А. Резников. Под общ. ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
86. Рыкалин, Н.Н. Тепловые характеристики взаимодействия плазменной струи с нагреваемым телом / Н.Н. Рыкалин, И.Д. Кулагин, А.В. Николаев // Автоматическая сварка, 1963. № 6. – С. 3
87. Клименов, В.А. Исследование теплового воздействия электронного пучка на композицию покрытие-основа / В.А. Клименов, Ж.Г. Ковалевская, А.Ю. Ерошенко, Д.В. Губарьков // Сварочное производство. 2002. № 6. С. 20–23.
88. Пузряков, А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 360 с.
89. Васильев, Л.Л. Теплофизические свойства пористых материалов / Васильев Л.Л., Танаева С.А. – Минск: Наука и техника, 1971. – 265 с.
90. Акулич, П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П.В. Акулич. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 443 с.
91. Кречмар, Э. Напыление металлов, керамики и пластмасс: пер. с нем. / Э. Кречмар, Г. Шварц; пер. Е. М. Стрельцова, Д. Н. Маневич; ред. М. Е. Морозов, И. А. Немковский. – М.: Машиностроение, 1966. 432 с.

92. Бучаков, С.В. Методика определения теплопроводности газотермических покрытий / С.В. Бучаков, Ю.И. Евдокименко, К.Б. Исаев, В.М. Кисель и др. // Вестник двигателестроения. 2011. № 2. – С. 31–35.

93. Конищев, Б.П. Расчет теплофизических коэффициентов сталей по их химическому составу и температурной зависимости теплофизических свойств цветных металлов / Б.П. Конищев, К.Б. Конищев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева № 5 (102). 2013. – С. 31 – 36.

94. Негода, Е.Н. Тепловые процессы при сварке: учеб. пособие / Е.Н. Негода; Дальневосточный государственный технический университет. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2008. – 125 с.

95. Невежин, С.В. Совершенствование состава проволок для дуговой металлизации жаростойких покрытий на основе нейросетевого моделирования: дис. ... канд. тех. наук: 05.02.10 / Невежин Станислав Владимирович. – Екатеринбург, 2014. – 127 с.

96. Самсонов, Г.В. Физико-химические свойства окислов. Самсонов Г.В., Борисова А.Л. и др. Справочник. Изд-во «Металлургия», 1978. – 472 с.

97. Плинер, Ю.Л. Металлургия хрома / Плинер Ю.Л., Игнатенко Г.Ф., Лаппо С.И. М.: Металлургия, 1965. – 362 с.

98. Атлас шлаков. Справ. изд. М.: Металлургия, 1985. – 208 с.

99. Коробов, Ю.С. Модель плазменного нагрева композиции «металлизационного покрытия – основа» / Ю.С. Коробов, В.С. Верхорубов, С.В. Невежин, Ю.Д. Щицын, Д.С. Белинин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2014. Т. 16. № 4(3). – С. 576–579.

100. Щицын, Ю.Д. Плазменная обработка материалов: учеб.-метод. пособие / Ю.Д. Щицын. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 116 с.

101. Гудремон, Э. Специальные стали. М.: Металлургиздат: 1959. – 952 с.

102. Химушин, Ф.Ф. Нержавеющие стали. М.: Металлургия. 1967. – 800 с.

103. Попов, А.А. Справочник термиста. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита / Попов А.А., Попова Л.Е. – Свердловск: Машгиз. 1961. – 430 с.

104. Белинин, Д.С. Плазменная закалка тяжело нагруженных деталей из стали 40Х13 / Д.С. Белинин, В.С. Верхорубов, П.С. Кучев, Н.Н. Струков, Ю.Д. Щицын // Вестник Пермского государственного технического университета, 2011. Т. 13. № 3. – С. 12–18.

105. Патент РФ № 2309825, 10.11.2007. Плазмотрон // Щицын Ю.Д., Косолапов О.А., Щицын В.Ю., Бюл. № 31.

106. Патент РФ № 2259262, 27.08.2005. Плазмотрон // Щицын Ю.Д., Косолапов О.А., Щицын В.Ю., Бюл. № 24.

107. Патент РФ № 2532215, 27.10.2014. Устройство для получения металлических порошков // Кучев П.С., Белинин Д.С., Струков Н.Н., Щицын Ю.Д., Бюл. № 30.

108. Верхорубов, В.С. Структура напыленных покрытий типа Fe-C-Cr-Ti-Al после плазменного оплавления / В.С. Верхорубов, Ю.С. Коробов, М.А. Филиппов, Ю.Д. Щицын, С.В. Невежин, С.Д. Неулыбин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2015. Т. 17. № 2. – С. 217–223.

109. Чернышов, Г.Г. Технология электрической сварки плавлением. М.: Академия, 2010. 496 с.

110. Гуляев, А.П. Металловедение: учебник для вузов / А. П. Гуляев, А. А. Гуляев. – М.: Альянс. 2011. – 643 с.

111. Плуг четырехкорпусный навесной ПЛН-4-35. Инструкция по эксплуатации. ЗАО «Рубцовский завод запасных частей». 2010. – 14 с.

112. Денисенко, М.И. Износ и повышение долговечности рабочих органов сельскохозяйственных машин / Денисенко М.И., Опальчук А.С. // Вестник ТНТУ. 2011. Спецвыпуск. Ч. 2. С. 201–210.

## Приложение А

### Листинг разработанной модели в MathCad 14

#### Исходные данные

##### Материал покрытия

$$c1 := 669 \quad \rho1 := 7115 \quad \lambda1 := 20.1 \quad a1 := \frac{\lambda1}{c1 \cdot \rho1}$$

$$\underline{h_p} := 210000 \quad h_{po} := 6340000$$

$$T_p := 1436 \quad T_{po} := 2735$$

##### Материал основы

$$c2 := 481 \quad \rho2 := 7850 \quad \lambda2 := 34 \quad a2 := \frac{\lambda2}{c2 \cdot \rho2}$$

##### Параметры изделия

$$L1 := 0.002 \quad L2 := 0.01 \quad \underline{L} := L1 + L2 = 0.012 \quad \underline{H} := 0.024 \quad B := 0.07$$

$$\alpha := 26 \quad b1 := \frac{2 \cdot \alpha}{c1 \cdot \rho1 \cdot L1}$$

##### Параметры источника

$$I := 160 \quad U := 29 \quad q := 0.24I \cdot U \quad \underline{V} := \frac{6}{3600}$$

$$I_s := 0.002 \quad h_s := 0.006 \quad G_p := 0.25 \quad d_s := 0.004 \quad t := \text{floor}\left(\frac{B}{V}\right)$$

$$k := 87500 \cdot \frac{G_p^{0.2} \cdot (1 + 0.06 \cdot I_s)}{I^{0.64} \cdot h_s^{0.46} \cdot d_s^{0.26}} = 1.139 \times 10^5$$

#### Вычислительный блок

##### Построение температурных полей в лоскости YOZ

$$x := 0 \quad N_y := 240 \quad i := 0..N_y \quad y_i := \frac{-H}{2} + \frac{H}{N_y} \cdot i \quad t0 := \frac{1}{4 \cdot a1 \cdot k}$$

$$N_z := 120 \quad u := 0..N_z \quad z_u := L - \frac{L}{N_z} \cdot u$$

$$c_{u,v} := \begin{cases} c1 & \text{if } z_u \leq L1 \\ c2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \lambda_u := \begin{cases} \lambda1 & \text{if } z_u \leq L1 \\ \lambda2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

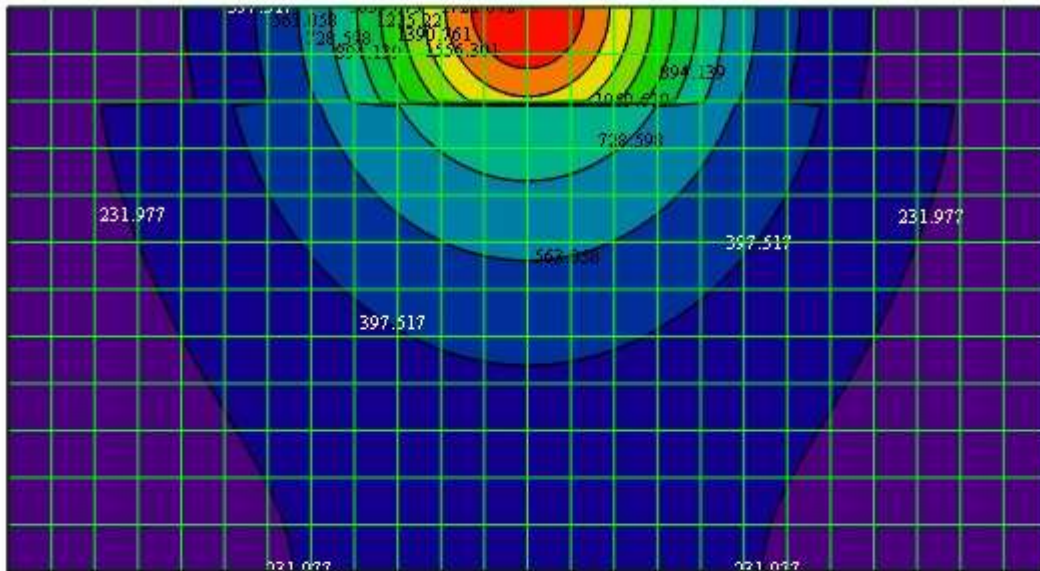
$$\rho_u := \begin{cases} \rho1 & \text{if } z_u \leq L1 \\ \rho2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad a_u := \begin{cases} a1 & \text{if } z_u \leq L1 \\ a2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\underline{T}_{u,v} := \frac{q}{8 \cdot c_u \cdot \rho_u \cdot (\sqrt{\pi \cdot a_u})^3} \int_{t0}^t \frac{1}{(\sqrt{\tau})^3} \cdot \exp\left[-\frac{[x + V \cdot (\tau)]^2 + (y_i)^2}{4 \cdot a_u \cdot (\tau)} - b1 \cdot (\tau)\right] \cdot \sum_{n=-3}^3 \left[ \exp\left[-\frac{(z_u - 2 \cdot n \cdot L)^2}{4 \cdot a_u \cdot (\tau)}\right] + \exp\left[-\frac{(z_u + 2 \cdot n \cdot L)^2}{4 \cdot a_u \cdot (\tau)}\right] \right] d\tau$$

```

T := for i ∈ 0..Ny
  for u ∈ 0..Nz
    Ti,u if Ti,u ≤ Tp
  otherwise
    q1i,u ← cu · Ti,u
    if q1i,u ≤ hp
      Ti,u ← Tp
      q1i,u ← q1i-1,u + q1i,u
    otherwise
      Ti,u if Ti,u ≤ Tpo
      otherwise
        q1i,u ← cu · Ti,u
        if q1i,u ≤ hpo
          Ti,u ← Tpo
          q1i,u ← q1i-1,u + q1i,u
        continue
  T

```



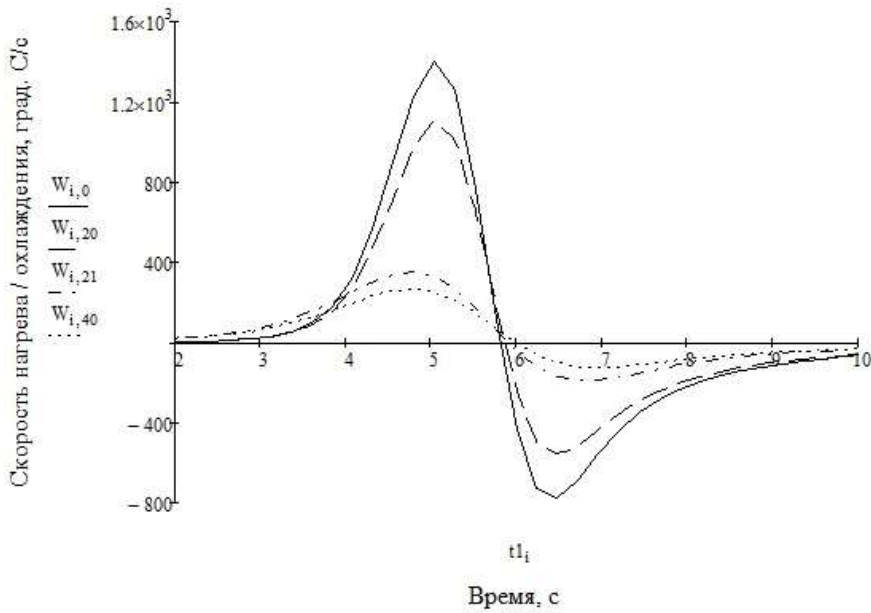
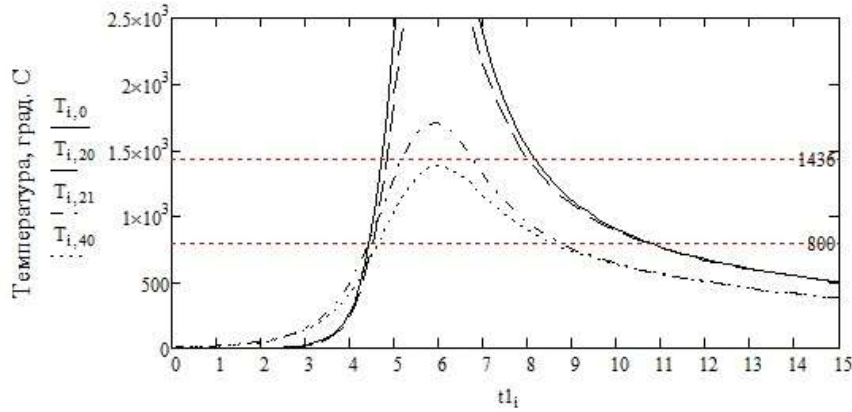
T

Построение термического цикла и графика скоростей нагрева / охлаждения

$$i := 0..200 \quad t1_i := \frac{0.0004 \cdot i}{V} \quad x_{\Delta i} := 0.025 - 0.001 \cdot i \quad y := 0 \quad z_u := \frac{L}{Nz} \cdot u$$

$$\frac{T_{i,u}}{T_{i,0}} = \frac{q}{8 \cdot c_u \cdot \rho_u \cdot (\sqrt{\pi \cdot a_u})^3} \int_{t_0}^t \frac{1}{(\sqrt{\tau})^3} \exp \left[ -\frac{[x_1 + V \cdot (\tau)]^2 + y^2}{4 \cdot a_u \cdot (\tau)} - b_1 \cdot (\tau) \right] \cdot \sum_{n=-3}^3 \left[ \exp \left[ -\frac{(z_u - 2 \cdot n \cdot L)^2}{4 \cdot a_u \cdot (\tau)} \right] + \exp \left[ -\frac{(z_u + 2 \cdot n \cdot L)^2}{4 \cdot a_u \cdot (\tau)} \right] \right] d\tau$$

$$\frac{W_{i,u}}{W_{i,0}} = \frac{q \cdot V}{8 \cdot c_u \cdot \rho_u \cdot (\sqrt{\pi \cdot a_u})^3} \int_{t_0}^t \frac{1}{(\sqrt{\tau})^3} \left[ \frac{1}{2} \frac{x_1 + V \cdot (\tau)}{a_u \cdot (\tau)} \exp \left[ -\frac{[x_1 + V \cdot (\tau)]^2 + y^2}{4 \cdot a_u \cdot (\tau)} - b_1 \cdot (\tau) \right] \cdot \sum_{n=-3}^3 \left[ \exp \left[ -\frac{(z_u - 2 \cdot n \cdot L)^2}{4 \cdot a_u \cdot (\tau)} \right] + \exp \left[ -\frac{(z_u + 2 \cdot n \cdot L)^2}{4 \cdot a_u \cdot (\tau)} \right] \right] \right] d\tau$$





## Приложение Б

## Результаты расчета по математической модели

Таблица 1 – Матрица значений температуры в плоскости ZOY, полученных в результате расчёта в математической модели на выбранных режимах, с шагом вдоль осей 1мм

Z, мм	Y, мм																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	87.1	119.3	164.8	230	325.1	325.1	675.5	983.3	1412	1948	2513	2735	2735	2735	2513	1948	1412	983.3	675.5	465.8	325.1	230	164.8	119.3	87.1
2	86.07	117.6	162.2	225.8	318.2	454	655	947.9	1353	1857	2385	2735	2735	2385	1857	1353	947.9	655	454	318.2	225.8	162.2	117.6	87.1	
3	83.08	113	154.9	214.1	298.8	421.2	598.8	852.1	1195	1614	2048	2385	2514	2385	2048	1614	1195	852.1	598.8	421.2	298.8	214.1	154.9	113	86.07
4	240.1	283.4	336.4	401.4	480.9	577	690.2	818	953.3	1084	1195	1270	1297	1270	1195	1084	953.3	818	690.2	577	480.9	401.4	336.4	283.4	83.08
5	232.4	272.5	321	379.5	450	533.7	630.8	738.7	851.6	959.9	1051	1112	1134	1112	1051	959.9	851.6	738.7	630.8	533.7	450	379.5	321	272.5	240.1
6	223.7	260.4	304	355.7	416.7	487.7	568.5	656.6	747.4	833.3	904.9	952.7	969.5	952.7	904.9	833.3	747.4	656.6	568.5	487.7	416.7	355.7	304	260.4	232.4
7	214.7	248	286.7	331.8	383.9	443.2	509	579.3	650.4	716.6	771.2	807.3	819.9	807.3	771.2	716.6	650.4	579.3	509	443.2	383.9	331.8	286.7	248	223.7
8	206	236.1	270.5	309.7	353.9	403	456.2	511.8	566.8	617.1	658	684.7	694.1	684.7	658	617.1	566.8	511.8	456.2	403	353.9	309.7	270.5	236.1	214.7
9	198.2	225.5	256.2	290.4	328.2	369.1	412.4	456.5	499.2	537.6	568.3	588.2	595.1	588.2	568.3	537.6	499.2	456.5	412.4	369.1	328.2	290.4	256.2	225.5	206
10	191.7	216.8	244.4	274.8	307.6	342.4	378.4	414.3	448.2	478.1	501.7	516.9	522.1	516.9	501.7	478.1	448.2	414.3	378.4	342.4	307.6	274.8	244.4	216.8	198.2
11	186.9	210.3	235.8	263.4	292.8	323.4	354.4	384.7	412.9	437.4	456.4	468.5	472.7	468.5	456.4	437.4	412.9	384.7	354.4	323.4	292.8	263.4	235.8	210.3	191.7
12	183.9	206.3	230.5	256.5	283.8	312	340.1	367.3	392.3	413.7	430.2	440.6	444.2	440.6	430.2	413.7	392.3	367.3	340.1	312	283.8	256.5	230.5	206.3	186.9
13	182.9	204.9	228.7	254.2	280.8	308.2	335.4	361.6	385.5	406	421.7	431.6	434.9	431.6	421.7	406	385.5	361.6	335.4	308.2	280.8	254.2	228.7	204.9	183.9

**Приложение В****Акт о внедрении результатов диссертационной работы**

ООО «Уральский институт сварки - металлургия»  
(ООО «УИС – металлургия»)

Юридический адрес: 620012, Екатеринбург, ул. Краснознаменная, 4А, оф. 13

Почтовый адрес: 620012, Екатеринбург, ул. Краснознаменная, 4А, оф. 13

тел/факс +7 (343) 3759569, [yukorobov@gmail.com](mailto:yukorobov@gmail.com)

ОГРН 1116673002984

ИНН 6673231404

КПП 667301001

**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы Верхорубова В.С.  
«Влияния плазменного оплавления на износостойкость металлизационных  
покрытий системы Fe-C-Cr-Ti-Al»

С целью повышения ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин, подверженных ускоренному абразивному износу при взаимодействии с почвой, в процессе эксплуатации, выполнена разработка технологии плазменного оплавления покрытий из порошковой проволоки ППМ-8 (80Х22ТЮ2), нанесенных методом активированной дуговой металлизации. В данной работе принимал участие Верхорубов Вадим Сергеевич и его доля участия составила 60 %.

Заместитель директора  
ООО «УИС – металлургия»



А.В. Семенова

## Приложение Г

### Акт эксплуатационных испытаний

УТВЕРЖДАЮ  
 Председатель СПК (Колхоз) имени Калинина  
 А.В. Сунцов  
 « 5 » *Августа* 2015 г.



#### АКТ эксплуатационных испытаний

В период с 06.07.2015 по 03.08.2015, во время проведения пахотных работ, механизаторами СПК имени Калинина проведены эксплуатационные испытания лемехов РЗЗ после плазменного оплавления металлизационного покрытия, напыленного из порошковой проволоки ППМ-8 (80Х22Т2Ю2), в условиях среднесуглинистых почв на полях Дебесского района Удмуртской республики. Выше указанные лемеха были установлены на плуг четырёхкорпусный навесной ПЛН-4-35, агрегатируемый трактором ВТ-150.

Целью проводимых эксплуатационных испытаний являлось определение ресурса упрочненных (опытных) лемехов, в сравнении с серийно-выпускаемыми, в условиях среднесуглинистых почв.

Испытания проводились при обработке почв на глубину до 25 см, при ее влажности в пределах 15–30 % и среднесуточной температуре воздуха 16 °С. Скорость движения агрегата в среднем составляла 7–9 км/ч.

До установки лемехов на плуг они были взвешены и измерены их основные геометрические размеры. Контрольные измерения проводились в конце каждой смены, при этом, наработка на один лемех составляла 0,5–2 га, в зависимости от погодных условий и технического состояния трактора. Перед проведением контрольных замеров лемеха подвергались тщательной зачистке от остатков почвы металлической щеткой.

Потери массы одного опытного лемеха при наработке 9,2 га составили 618 г, тогда как потери массы серийного, закаленного лемеха, при той же наработке, составили 919 г, а для лемеха с ТВЧ наплавкой износостойкого сплава Сормайт 1 – 823 г. Полная наработка опытного лемеха составила 12 га. При этом, наблюдается сохранение угла заточки лезвия, который составил 23–25 ° для опытного и 30–33 ° для серийного лемехов.

#### Выводы:

- износостойкость опытного лемеха на 34 % выше чем у серийного;
- наблюдается четко выраженный эффект самозатачивания опытного лемеха, что снижает тяговое усилие на плуг.

Представитель СПК им. Калинина

Заведующий мастерскими

А.В. Сунцов

Представитель ООО «УИС – металлургия»

Инженер

В.С. Верхорубов