

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт механизации и технического сервиса

Кафедра «Эксплуатация и ремонт машин»

Научно-квалификационная работа

Байниязовой Акмарал Таскараевны

по теме: **«Восстановление и упрочнение рабочих органов и деталей**

сельскохозяйственных машин и механизмов методами дуговой

металлизации и электроискровой обработки»

Направление подготовки: 05.20.03 – Технологии и средства технического
обслуживания в сельском хозяйстве

Научный руководитель: д.т.н., профессор

Н.Р.Адигамов

Работа обсуждена на заседании кафедры и допущена к представлению
научного доклада об основных результатах подготовленной научно-
квалификационной работы (диссертации) на государственной итоговой
аттестации (протокол №__ от _____ 20__ г.)

Зав. кафедрой «Эксплуатация и ремонт машин»,

д.т.н., профессор

Н.Р.Адигамов

Казань 2018

РЕФЕРАТ

научной квалификационной работы Байниязовой А.Т.

на тему: **Восстановление и упрочнение рабочих органов и деталей
сельскохозяйственных машин и механизмов методами дуговой
металлизации и электроискровой обработки**

На сегодня в период острой борьбы в сфере производства востребованной и конкурентоспособной продукции особую роль играет создание различных машин и механизмов с повышенными ресурсными характеристиками. Основной причиной ухудшения технического состояния машин и механизмов является износ поверхностей сопряжения узлов трения. Поэтому разработка конкурентоспособной технологии, которая позволяет существенное снижение износа поверхностей сопряжения узлов трения машин и механизмов является актуальной задачей.

Одним из решений этой проблемы является технологии упрочнения поверхностей сопряжения узлов трения машин и механизмов с применением концентрированных потоков энергии. В данной работе для такой технологии в качестве концентрированного потока энергии выбраны дуговая металлизация и электроискровой разряд. Показано, что методы дуговой металлизации и электроискровой обработки в конкретных случаях имеют определенные преимущества перед другими методами.

Работа состоит из введения и четырех глав. Во введении обоснована актуальность темы, определены объект и предмет исследований, основная цель и задача работы, отражена научная новизна, дана характеристика практической значимости исследований. В первой главе сделан обзор существующих технологий упрочнения поверхностей сопряжения узлов трения машин и механизмов. Вторая глава посвящена теоретическим аспектам исследований технологий дуговой металлизации и электроискровой обработки. В третьей главе описаны методы исследований и экспериментальные установки дуговой металлизации и электроискрового упрочнения металлических поверхностей. В четвертой главе рассмотрены некоторые характеристики экспериментальных установок и параметров упрочненных поверхностей. В заключении подведены итоги проделанной работы и сделаны выводы.

Объем работы 102 с, 6 табл., 27 рис. Лит. ист. 54.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. Обзор технологий упрочнения сопрягаемых поверхностей машин и механизмов с применением методов дуговой металлизации и электроискровой обработки.....	12
1.1. Методы упрочнения поверхностей изделий концентрированными потоками энергий.....	12
1.2. Упрочнение методами дуговой металлизации.....	14
1.3. Преимущества и недостатки метода электродуговой металлизации.....	18
1.4. Технология электродуговой металлизации.....	20
1.5. Области применения метода дуговой металлизации.....	21
1.6. Оборудование для дуговой металлизации.....	22
1.7. Упрочнение методами электроискровой обработки.....	26
1.8. Сущность электроискровой обработки.....	28
1.9. Технологии и области применения электроискровой обработки.....	30
1.10. Перспективы ЭИ технологий.....	32
1.11. Оборудование для электроискровой обработки.....	35
Выводы по главе 1.....	38
Глава 2. Теоретические аспекты исследований технологий дуговой металлизации и электроискровой обработки.....	39
2.1. Физические процессы при напылении дуговой металлизацией.....	39
2.2. Анализ условий повышения качества покрытий при дуговой металлизации.....	43
2.3. Физические процессы при электроискровой обработке.....	52
2.4. Термодинамическая модель процесса структурной модификации при ЭИО.....	54
Глава 3. Экспериментальные установки и исследовательское оборудование...	61
3.1. Описание экспериментальной установки дуговой металлизации.....	61
3.1.1. Назначение электродугового металлизатора ЭДМ- 11ШД.....	61

3.1.2. Устройство и принцип работы.....	62
3.1.3. Технология напыления покрытий.....	66
3.2. Описание экспериментальной установки электроискровой обработки.....	67
3.2.1. Принцип действия установки.....	67
3.2.2. Электрическая схема установки.....	68
3.3. Методы исследования и исследовательское оборудование.....	71
3.3.1. Методы осциллографических исследований.....	71
3.3.2. Фотографические исследования топографии обработанной поверхности электроискровым разрядом.....	72
3.3.3. Электрофизические методы исследования структуры поверхностного слоя обработанного изделия электроискровым разрядом.....	76
Глава 4. Экспериментальные исследования влияния электроискрового разряда на физико-механические свойства поверхностного слоя изделия.....	81
4.1. Вольт-амперная характеристика электроискрового разряда.....	81
4.2. Топография обработанной поверхности электроискровым разрядом.....	83
4.3. Структура и состояние поверхностного слоя образца после обработки электроискровым разрядом.....	84
Заключение.....	92
Список использованных источников.....	95
Приложение: Акт внедрения.....	102

ВВЕДЕНИЕ

На сегодня во всем мире стоит проблема создания различных конкурентоспособных машин и механизмов с повышенными ресурсными характеристиками. В процессе эксплуатации любое техническое изделие, имеющее узлы трения, по мере изнашивания деталей теряет свою работоспособность и в результате не может выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации. Основной причиной ухудшения технического состояния машин и механизмов является износ поверхностей сопряжения узлов трения. Износ практически исключить невозможно, но его можно максимально уменьшить и добиться существенного повышения ресурса работы машин и механизмов. Поэтому разработка конкурентоспособной технологии, которая позволяет существенное снижение износа поверхностей сопряжения узлов трения машин и механизмов является актуальной задачей.

Поверхности сопряжения узлов трения сегодняшних конкурентоспособных машин и механизмов должны характеризоваться такими физико-механическими и эксплуатационными свойствами, как высокая твердость, прочность, износостойкость, коррозионная стойкость, теплостойкость, теплопроводность, жаростойкость и хладостойкость. Добиться таких свойств позволяют технологии упрочнения поверхностей сопряжения узлов трения машин и механизмов с применением концентрированных потоков энергии. В данной работе для такой технологии в качестве концентрированного потока энергии выбраны дуговая металлизация и электроискровой разряд.

В процессе обучения в аспирантуре были вначале рассмотрены вопросы дуговой металлизации. Поэтому в диссертации отражены результаты изучения и этого вопроса. Процесс электродуговой металлизации известен с 50-х годов прошлого столетия. Основное его применение для антикоррозионной защиты металлоконструкций. Таких поверхностей, как поверхности мостов, причалов, морского и речного транспорта, грузового, пассажирского, авто- и электротранспорта, ограждения дорог, опор ЛЭП, теплиц, трубопроводов и др.

Поскольку задачами диссертации были вопросы восстановления деталей сельскохозяйственных машин с заданными физико-механическими свойствами, основной упор в работе был сделан на исследование и применение электроискрового разряда.

По сравнению с энергиями других источников, например, таких, как лазерных, плазменных (плазмотроны) и электронно-лучевых установок, энергия электроискрового разряда позволяет не только создавать на поверхности детали упрочненный слой с оплавленной основой и перемешанным с материалом электрода, но и производить упрочнение материала основы по глубине детали на 0,5 – 1,0 мм. Кроме того, установки электроискрового упрочнения по стоимости более чем на порядок ниже стоимости вышеуказанных установок. Поэтому учет такого показателя, как соотношение цены и качества получаемой продукции также имеет немаловажное значение. Лучшие результаты по упрочнению поверхностей сопряжения машин и механизмов с применением электроискрового разряда можно получить при использовании в технологическом процессе металлокерамических порошков, таких как карбиды, нитриды, бориды и оксиды.

Электроискровому упрочнению подвергают поверхности деталей машин типа кулачков, направляющих, фиксаторов, прижимов, толкателей, клиньев; шпоночных пазов, шлицев; отверстия корпусных деталей, изготовленных из конструкционных легированных и углеродистых сталей; инструментов и технологической оснастки.

Упрочняющая электроискровая обработка (ЭИО) основана на протекании импульсного разряда между электродом (анодом) и деталью (катодом). Сущность ЭИО заключается в полярном переносе материала электрода на деталь (наращивание) при одновременном термическом воздействии тока и легировании поверхности детали элементами упрочняющего электрода и азота воздуха. Упрочненный слой отличается высокой твердостью, обусловленной образованием карбидов, нитридов, карбонитридов и закалочных структур.

Электроискровое упрочнение и нанесение металла происходит в воздушной или газовой среде при тепловом и химическом действии электрического разряда между поверхностью изделия и упрочняющим электродом, которому сообщается колебательное движение от вибратора. За очень короткое время электроискрового разряда ($10^{-8} - 10^{-2}$ с) через электроды проходит мощный (до 10^6 А/мм²) импульс тока, накопленного в конденсаторах. Температура в межэлектродном зазоре повышается до 11 000° С. При такой температуре азот и легирующие элементы, содержащиеся в электроде, легируют поверхность детали, повышая ее физико-механические свойства.

Недостаток метода – невозможность получения упрочненного слоя значительной толщины и снижение усталостной прочности.

Несмотря на то, что на производстве более 50 лет эффективно используется ЭИО, как технологический метод создания поверхностных слоев с требуемыми параметрами на различных металлических объектах возможности этого метода не исчерпаны. Например, при ЭИО происходит не только упрочнение поверхности, но в точках воздействия искры на поверхность и разрушение поверхностного слоя с образованием лунок. Поэтому поверхность детали становится с необычным рельефом. Тем не менее, для пар трения этот «дефект» играет положительную роль. Лунки на обработанной поверхности будут выполнять функции масляных карманов. Они представляют собой замкнутые резервуары и обеспечивают высокую задиростойкость пары трения [1]. Кроме того, при разрушении поверхностного слоя под воздействием электрической искры образуются износостойкие, пористые и с высокой твердостью порошки, которых можно использовать как катализаторы. При использовании металлокерамических порошков (МКП), таких как карбиды, нитриды, бориды и оксиды, в технологическом процессе упрочнения ЭИО позволит варьировать в широком диапазоне физико-механические свойства упрочненных поверхностей сопряжения машин и механизмов.

В практике зарубежных стран в качестве упрочняющих технологий используются дорогостоящие методы легирования с последующей термической

обработкой, а также методы электролитического упрочнения деталей (электролитическое хромирование, химическое никелирование и т.д.), связанных с загрязнением окружающей среды и отрицательным воздействием на здоровье человека. Укрепление производственного потенциала страны, развитие отечественной науки и техники, достижение технологической независимости в критических областях невозможно решить за счет зарубежных технологий. Ни один зарубежный партнер никогда не опубликует и не продаст свое последнее достижение. Основой импортозамещения должно стать развитие собственного машиностроения на базе достижений своих ученых.

Потенциальными мировыми научными конкурентами в той или иной степени по теме диссертации могут быть следующие организации:

- Институт Внеземной физики общества Макса Планка г. Гархинг, Германия (Institut für extraterrestrische Physik der Max-Planck-Gesellschaft, Garching, Deutschland) – проводятся исследования свойств различных видов электрических разрядов;
- Университет штата Северной Дакоты, США (University of North Dakota, USA) – проводятся исследования процессов получения покрытий с использованием термической плазмы атмосферного давления для восстановления сельскохозяйственной техники;
- Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Россия – проводятся исследования в области применения плазмы дугового разряда в процессах напыления и плазмохимии, разрабатывает системы генерации плазмы дугового разряда;
- Федеральная политехническая школа Лозанны, Швейцария, Лозанна (Federal Polytechnic School of Lausanne, Schweiz, Lausanne) – проводятся исследования в области применения плазмы дугового разряда в процессах напыления и плазмохимии, разрабатывает генерации плазмы дугового разряда;
- Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия – исследования: диагностика плазмы, физика низкотемпературной плазмы и плазменные технологии, теория плазмы, компьютерное моделирование плазмы;

Рассматривая научных конкурентов, надо полагать, что, с одной стороны, они конкуренты, а, с другой стороны, их результаты исследований во многом помогут более успешно решить поставленные задачи диссертантом.

На сегодняшний день имеется множество литературы, как отечественной, так и зарубежной, по исследованию физики и применению концентрированных потоков энергии. Однако множество этих исследований не привязаны к конкретным технологическим задачам. Они носят в большинстве случаев общий характер, относящийся к исследованию физики и свойств самих концентрированных потоков энергии или возможностей этой энергии для решения тех или иных видов технических задач. На сегодня практически отсутствуют производственные технологии для реализации конкретной технической задачи рассматриваемого направления.

Цель работы – совершенствование технологий упрочнения сопрягаемых поверхностей машин и механизмов с применением концентрированных потоков энергии.

Задачи исследований:

- Изучение вольт-амперной характеристики электроискрового разряда;
- Проведение экспериментов по упрочнению поверхностей различных металлов на электроискровой установке и установке дуговой металлизации;
- Исследование физико-механических свойств покрытий, полученных методом электроискрового легирования, в том числе с применением металлокерамических порошков;

Объект исследований – технологии и устройства упрочнения сопрягаемых поверхностей машин и механизмов с применением методов дуговой металлизации и электроискровой обработки.

Предмет исследований – физико-механические свойства поверхностного слоя металлических изделий, обработанных электроискровым разрядом.

Научная новизна:

- Новые результаты исследований процесса упрочнения поверхностей металлических изделий, обработанных электроискровым разрядом;

Методы исследований:

- Фотографические исследования топографии обработанной поверхности электроискровым разрядом;
- Методы осциллографических исследований;
- Электрофизические методы исследования структуры поверхностного слоя обработанного изделия электроискровым разрядом;

Практическая значимость работы.

Уникальность проводимых исследований заключается в обеспечении решения поставленных задач в соответствии с современными требованиями мирового уровня научно-исследовательских работ, если учесть, что потери от трения и износа в развитых государствах достигают 5...6 % национального дохода, а преодоление сопротивления трения поглощает во всем мире 20...25 % вырабатываемой в год энергии. Проведенные исследования по тематике диссертации в нашей стране и за рубежом на сегодня носят лишь общий характер. Значимость полученных результатов заключается в том, что на основе проведенных исследований можно разработать новое устройство для электроискрового легирования металлических изделий, которое будет применимо в различных областях промышленной деятельности, в том числе – в инструментальном, литейном и ремонтном производстве, сельхозмашиностроении и автотракторостроении.

Достоверность и обоснованность результатов исследований подтверждается общепринятыми методами исследований с помощью современных контрольно-измерительных приборов и оборудования, а также данными проведенных экспериментальных работ.

Реализация результатов исследований. Результаты исследований используются в учебном процессе ФГОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Международная научно-практическая конференция: «Современное состояние, проблемы и перспективы развития сервиса агропромышленного комплекса»;
- Международная научно-практическая конференция «Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы»;
- 75-ая студенческая (региональная) научная конференция «Студенческая наука- аграрному производству»;
- Научно-практическая конференция «Аграрная наука XXI века»;
- Международная научно-практическая конференция: «Современное состояние, проблемы и перспективы развития механизации и технического сервиса агропромышленного комплекса».

Публикации. По теме НКР опубликовано 8 статей.

Структура и объем научно-квалификационной работы. НКР состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 102 страницах машинописного текста, содержит 27 рисунков и 6 таблиц. НКР содержит библиографию из 54 наименований.

Глава 1. Обзор технологий упрочнения сопрягаемых поверхностей машин и механизмов с применением методов дуговой металлизации и электроискровой обработки

1.1. Методы упрочнения поверхностей изделий концентрированными потоками энергий

Работы ученых и специалистов-практиков показывают, что более 75 % изношенных деталей целесообразно повторно использовать после восстановления; это существенно снижает нагрузку на машиностроительное производство, а, кроме того, экономически оправдано как для ремонтного производства, так и для потребителя. Реальные затраты на восстановление детали обычно не превышают 25 – 30% ее стоимости, а при грамотном назначении технологии восстановления достигается 100%-ый ресурс [2, 3].

Известно, что прочностные свойства деталей зависят от физико-механических характеристик материала, из которого они изготовлены. Но ресурс деталей и инструментов при достаточной прочности основного материала обычно связан с качеством рабочей поверхности и эксплуатационными свойствами их поверхностного слоя. Он может быть существенно повышен путем изменения рельефа поверхности, состава, структуры и свойств поверхностного слоя. Для создания поверхностных слоев с требуемыми характеристиками (состав, структура, толщина и др.) применяют различные методы обработки – механические, термические, электрофизические, электрохимические и их сочетание. В результате формируются поверхностные слои толщиной от нескольких микрометров до 1 мм и с более улучшенными характеристиками и противостоящие истиранию, повышенной температуре, коррозии, эрозии и другим факторам, инициирующим изнашивание рабочих поверхностей деталей. Широкое применение на практике для упрочнения и восстановления металлических поверхностей нашли методы, основанные на использовании

концентрированных потоков энергии с удельной мощностью в пятне нагрева более 10^2 Вт/мм² (Таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Энергетические характеристики некоторых термических источников энергии для упрочнения и восстановления деталей [4]

Источники энергии	Температура пламени, плазмы или дуги, °К	Наименьшая площадь нагрева, мм ²	Наибольшая плотность мощности энергии в пятне, Вт/мм ²
Газовое пламя	3000...3500	1	5×10^2
Топливо- плазменное пламя	4000...5000	1	5×10^2
Дуга в парах: щелочных металлов железа	4000...5000	1	1×10^2
	5000...6000	1	1×10^3
Дуга в газах: водород, азот аргон, гелий	5000...8000	1×10^{-1}	1×10^3
	10000...20000	1×10^{-4}	1×10^3
Дуга электродугового металлизатора	5000...6000	1	1×10^4
Микроплазменная дуга	-	1×10^{-4}	1×10^6
Электронный луч	-	1×10^{-5}	1×10^7
Лазерный луч	-	1×10^{-7}	1×10^8
Электрическая искра в газовой среде	7000...20000	1×10^{-6}	$10^6 \dots 10^9$

Как следует из таблицы 1.1, наибольшей концентрацией энергии в пятне нагрева обладает электрическая искра.

1.2. Упрочнение методами дуговой металлизации

Процесс электродуговой металлизации известен давно, и начиная с 50-х годов прошлого столетия широко применяется для антикоррозионной защиты металлоконструкций. Он используется как в машиностроительном, так и в ремонтном производстве [4 – 9]. При электродуговом напылении покрытие формируется из капель жидкого металла, движущихся в струе транспортирующего газа (рис. 1.1).

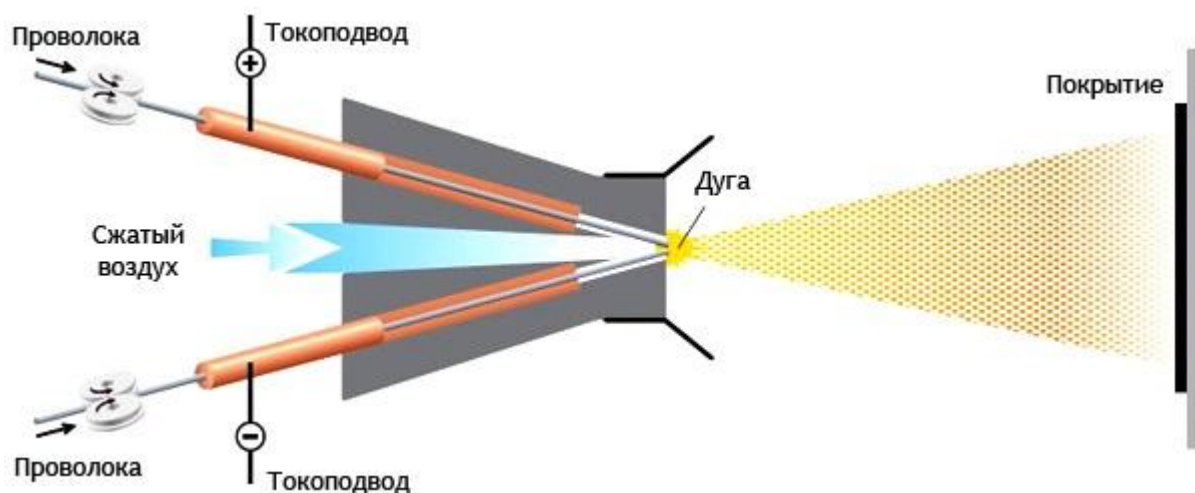


Рис. 1.1 – Общая схема дуговой металлизации

Сущность процесса дуговой металлизации заключается в том, что расплавление металла осуществляется тепловой энергией электрической дуги, которая горит между двумя электродными проволоками. Жидкий металл при помощи либо струи сжатого воздуха, либо другого инертного газа сдувается с концов электродов, дробится под воздействием газодинамических и электромагнитных сил до мелкодисперсного состояния и в виде капель движется в направлении к поверхности напыляемой основы. Скорость подачи двух электродных проволок строго синхронизирована со скоростью плавления металла этих проволок. В процессе полета мелкодисперсные частицы металла

переходят из жидкотекучего состояния в пластичное состояние. Частицы металла, обладая высокой кинетической энергией, соударяются об заранее подготовленную поверхность (искусственная шероховатость) и закрепляются на ней. Таким образом, на восстанавливаемой поверхности слой за слоем наращивается напыленный металл. Толщина восстанавливаемой поверхности при дуговой металлизации может составлять от нескольких мкм до нескольких мм.

Плавление электродов происходит в основном за счет энергии, выделяемой дугой в зоне приэлектродных пятен. Среднемассовая температура жидкого металла, распыляемого струей газа, находится в пределах от температуры плавления до температуры кипения. Такой значительный разогрев присадочного материала приводит к существенным потерям легирующих элементов вследствие угара. Устойчивый процесс распыления соответствует режимам горения дуги без коротких замыканий, что обеспечивается наличием динамического равновесия между средней скоростью плавления и скоростью подачи электродов. При таком режиме на торце электродов сначала происходит накапливание расплавленного металла, а затем его распыление газовым потоком. Наряду с периодическим выбросом порций металла из межэлектродного промежутка при металлизации наблюдается также непрерывное струйное стекание перегретого металла с поверхности электродов. Размеры напыляемых частиц при электродуговой металлизации составляют примерно 100 мкм, что соответствует массе частицы $1,4 \cdot 10^{-9}$ кг. Максимальный размер частиц, за редким исключением, не превышает 200 мкм. Металл, покинувший электроды, продолжает дробиться под воздействием газодинамических сил воздушной струи. Причем это диспергирование во многом зависит как от давления транспортирующего газа, так и от свойств расплавленного металла, в том числе от его перегрева.

Электродуговую металлизацию проводят при давлении сжатого воздуха или защитного газа 0,5 – 0,6 МПа. Сила тока при электродуговой металлизации колеблется в пределах:

- от 35 до 100 А для легкоплавких металлов (алюминия и цинка);
- от 70 до 200 А для сталей и сплавов на основе железа и меди.

Напряжение изменяется в диапазоне от 20 до 35 В. Производительность при напылении цинка составляет до 32 кг/ч, алюминия - до 9 кг/ч.

Скорость движения частиц металла в газовом потоке колеблется в пределах от 120 до 300 м/с. Это определяет кратковременность их переноса на поверхность детали (время полета составляет тысячные доли секунды) и значительную кинетическую энергию, которая в момент соударения с поверхностью детали переходит в тепловую и вызывает дополнительный разогрев зоны контакта. Удар в момент соприкосновения с поверхностью детали вызывает уплотнение металлизированного слоя и снижает его пористость до 10-20 %.

Электродуговой металлизацией можно получить слои в широком диапазоне толщин от 10 мкм до 1,5 мм для тугоплавких металлов и 3,0 мм для легкоплавких. Производительность при электродуговой металлизации составляет 3 – 20 кг/ч.

Металлизированный слой может наноситься на наружные и внутренние поверхности конструкций под углом распыления расплавленного металла по отношению к поверхности детали от 45° до 90°. Для получения высокого качества покрытия струю распыленного металла направляют перпендикулярно к обрабатываемой детали и выдерживают расстояние от сопла металлизатора до изделия (детали) не более 150 – 200 мм. В таблице 1.2 представлены данные о влиянии дистанции распыления на характеристики металлизированного слоя.

Таблица 1.2 – Физико-механические свойства покрытия при разной дистанции металлизации.

Свойства*	Расстояние от сопла до детали, мм					
	25	50	75	100	200	300
Прочность сцепления, МПа	110	120	130	140	140	130

Содержание в покрытии оксидов, %	8	10	15	18	30	45
Общая пористость, %	6,71	6,71	5,9	6,13	7,5	8,0
Твердость покрытия (HV)	216	225	309	280	224	195
Предел прочности, МПа:						
При растяжении	160	200	220	200	160	120
При сжатии	1510	1450	1200	1020	850	570
*Покрытия получены при силе тока 90 А и напряжении 30 В.						

Поверхность, предназначенная под металлизацию, должна быть очищена от грязи, масел, ржавчины. Перед обработкой поверхности обезжиривают. Для снижения термических внутренних напряжений процесс металлизации следует вести с перерывами между отдельными проходами, не допуская перегрева металлизируемой поверхности.

Вначале металл наносят на участки детали с резкими переходами, углами, галтелями, уступами, а затем осуществляют металлизацию всей поверхности, равномерно наращивая металл. Требуемые размеры, качество отделки и правильную геометрическую форму поверхностей, покрытых распыленным металлом, получают при окончательной механической обработке.

Качество напыленного слоя во многом зависит от качества подготовки поверхности. Подготовка поверхности под металлизацию заключается в следующем:

1. Тщательная очистка и обезжиривание поверхности.
2. Нанесение искусственной шероховатости в виде рваной резьбы, искусственных рисок, дробеструйной и пескоструйной обработки.
3. Повторная очистка и сушка в печи при температуре 250°С в течении 2-х часов. После сушки деталь необходимо направить на металлизацию в течение 2-х часов.

В электрометаллизаторе установлены направляющие (рис.1.1), через которые непрерывно производится подача двух распыляемых проволок. Между концами этих проволок возбуждается электрическая дуга. В центральной части

электрометаллизатора имеется сопло, через которое подается сжатый воздух. Струя сжатого воздуха отрывает с проволок-электродов частицы расплавленного металла и уносит их к напыляемой поверхности.

Электрометаллизатор может работать как на постоянном, так и на переменном токе. При использовании переменного тока дуга горит неустойчиво и сопровождается большим шумом. При постоянном токе характер работы является устойчивым, напыленный материал имеет мелкозернистую структуру, производительность напыления высокая. Поэтому в настоящее время для дугового напыления используют источники постоянного электрического тока. Для напыления обычно используют проволоку диаметром 0,8; 1,0; 1,6 и 2,0 мм. Выбор материала для нанесения покрытия зависит от условий эксплуатации и основных изнашивающих процессов, протекающих на поверхностях. Основным видом присадочного материала является непрерывный проволочный электрод. Применяют как проволоки сплошного сечения, так и порошковые диаметром от 1,0 до 2,5 мм. Скорость подачи проволоки варьируется от 220 до 850 м/ч.

1.3. Преимущества и недостатки метода электродуговой металлизации

Преимуществом метода электродуговой металлизации является высокая производительность процесса и возможность значительного сокращения затрат времени на напыление. Например, при силе тока 750 А можно напылять стальное покрытие с производительностью 36 кг/ч, что превышает в несколько раз производительность газопламенного напыления. По сравнению с газопламенным напылением металлизация позволяет получать более прочные покрытия, которые лучше соединяются с основой. При использовании в качестве электродов проволок из двух различных металлов можно получить покрытие из их сплава. Эксплуатационные затраты электрометаллизатора довольно небольшие. При напылении покрытия распылением двух электродов из разнородных материалов желательно использовать такие

электрометаллизаторы, которые бы позволяли производить отдельную регулировку скорости подачи каждого электрода.

Достоинства метода электродуговой металлизации:

- низкие энергозатраты на получение покрытия. Не требуется использования кислорода, керосина или горючего газа, что уменьшает стоимость покрытия;
- оператор может использовать две различные проволоки во время металлизации для получения покрытий с требуемыми свойствами;
- высокая производительность процесса (до 100 кг/ч и более по цинку) при достаточно эффективном использовании распыляемого материала (0,65 – 0,8);
- значительные толщины напыляемого покрытия (до 10 – 15 мм);
- относительно малое тепловое воздействие на основу (нагрев в пределах 80 – 200 °С);
- существенно долгий срок службы металлизированных покрытий, вплоть до 30 лет;
- возможность нанесения покрытий на изделия практически без ограничения размеров;
- легкость и простота обслуживания оборудования, его высокая надежность;
- возможность автоматизации процесса с созданием автоматических линий.

Не требуется использования кислорода, керосина или горючего газа, что уменьшает стоимость покрытия.

Оператор может использовать две различные проволоки во время металлизации для получения покрытий с требуемыми свойствами

Недостатком рассматриваемого метода является перегрев и окисление напыляемого материала при малых скоростях подачи распыляемой проволоки. Кроме того, большое количество теплоты, выделяющейся при горении дуги, приводит к значительному выгоранию легирующих элементов, входящих в напыляемый сплав (например, содержание углерода в материале покрытия снижается на 40 – 60%, а кремния и марганца – на 10 – 15%). Это необходимо

иметь в виду и применять для напыления проволоку, содержащую повышенное количество легирующих элементов.

Основные недостатки, которые имеет электродуговая металлизация :

- ограниченный круг материалов для напыления из-за требований электропроводности и поставки в виде проволоки;
- наличие значительного количества оксидов в покрытии, что снижает его ударную прочность;
- не во всех случаях достаточная прочность сцепления покрытий с основой (15 – 45 МПа);
- наличие пористости препятствует применению покрытий в коррозионных средах без дополнительной обработки.

1.4. Технология электродуговой металлизации

Прежде чем приступить непосредственно к выполнению процесса нанесения покрытия, выполняют ряд подготовительных работ: наматывают на катушки кассетного блока проволоку и заряжают ее в металлизатор, производят регулировку распылительной головки, устанавливают по манометру требуемое давление сжатого воздуха, включают источник питания и устанавливают заданное напряжение. Пуск аппарата производят в следующем порядке: открывают воздушный кран, включают ток и затем подачу проволоки.

Качество наносимого покрытия и эффективность процесса во многом зависят от выбранного режима металлизации, основными параметрами которого являются: напряжение на дуге, давление сжатого воздуха, расстояние от металлизатора до поверхности детали, частота вращения детали и скорость перемещения металлизационного аппарата относительно детали.

Напряжение на дуге выбирают в зависимости от применяемой проволоки. Давление сжатого воздуха при металлизации должно быть 0,6 – 0,7 МПа. Покрытие наносят на расстоянии 80 – 120 мм от металлизатора до поверхности детали. Скорость перемещения металлизатора относительно восстанавливаемой поверхности выбирают такой, чтобы толщина наносимого слоя за один проход не превышала 0,10 – 0,15 мм. При малых скоростях вращения детали и

перемещения металлизатора происходит сильный нагрев покрытия, что приводит к снижению его твердости и износостойкости. При электродуговой металлизации общий нагрев детали не должен превышать 60°C. Для исключения перегрева покрытия, деталь во время металлизации обдувают сжатым воздухом под давлением 0,05 – 0,07 МПа; при этом струю воздуха пускают на некотором удалении от пучка летящих на деталь металлических частиц. Температура детали перед нанесением покрытия не должна быть ниже 15°C.

Плоские детали рекомендуется металлизировать полосами. Каждая вновь наносимая полоса должна перекрывать предыдущую на треть ее ширины. Для механической обработки нанесенного покрытия необходимо оставлять припуск, величина которого зависит от диаметра восстанавливаемой детали. На обработку алюминиевых покрытий припуск дают около 0,5 мм.

При нанесении покрытий электродуговой металлизацией возможны различные дефекты. Образование неровного бугристого слоя является следствием слишком большой подачи электродной проволоки, недостаточного напряжения или давления сжатого воздуха. Причинами пережога нанесенного слоя металла могут быть повышенные напряжение и сила тока, недостаточная скорость продольного перемещения металлизатора, нанесение слишком толстого слоя покрытия, пониженное давление воздуха.

1.5. Области применения метода дуговой металлизации

Основное применение метода дуговой металлизации для антикоррозионной защиты металлоконструкций. Таких поверхностей, как поверхности мостов, причалов, морского и речного транспорта, грузового, пассажирского, авто- и электротранспорта, ограждения дорог, опор ЛЭП, теплиц, трубопроводов и др.

Область применения металлизации при восстановлении деталей:

- восстановление изношенных наружных и внутренних поверхностей деталей машин преимущественно цилиндрической формы (например, валов, штоков, втулок, вкладышей подшипников, цельных подшипников и др.);
- создание на деталях поверхностного слоя с определенными свойствами (износостойкого, коррозионно-стойкого, антифрикционного, жаростойкого, с повышенной теплопроводностью или электропроводностью и т.д.);
- нанесение защитно-декоративных покрытий.

Сферы применения электродуговой металлизации:

- Износостойкие покрытия;
- Мосты (бетон и сталь);
- Производство цемента;
- Инженерные покрытия;
- Ветряные электростанции;
- Нефть и газ;
- Металлургия;
- Судостроение/судоремонт;
- Металлические конструкции;
- Теплоэлектростанции;
- Горнодобывающая промышленность;
- Утилизация и переработка отходов;
- Целлюлозно-бумажная промышленность.

1.6. Оборудование для дуговой металлизации

На сегодня известны следующие отечественные электродуговые металлизаторы марок: КДМ-2, ТОМ-14Н, С14А, ЭМ-6, ЭДМ-11ШД, МЭС-1, ЭМ-12, ЭМ-15, ЭМ-3, РЭМ-3А, ЭМ-9, ЭМ-10, УЭМ-500ТЛ, МС8830, 101/700 PL, МС8835/102DC, МС8835/101АС, PWS HD 4000, ЭМ 22, КДМ 4. Они классифицируются по типу привода подачи проволоки: пневмопривод или электропривод; а также по технологическому исполнению: ручные

(переносные) или стационарные (станочные). В комплект оборудования входят источник тока, пульт управления, кассетный блок для проволоки, металлизационный аппарат и дистанционный блок управления.

Для работы металлизационного аппарата необходим сжатый воздух под давлением 0,6-0,7 МПа. Пост металлизации оснащают камерой с вытяжной вентиляцией, механизмами вращения детали и перемещения металлизатора относительно детали. Для нанесения покрытий методом электродуговой металлизации используют проволоку диаметром 1,5-2,0 мм. Стальные и чугунные детали металлизуют проволокой Св-0,8А, Св-0,8Г2С, Нп-65Г и др. При восстановлении деталей из алюминиевых сплавов используют проволоку Св-АК5, АМц и др. Перед применением проволока должна быть очищена и обезжирена.

Электродуговые металлизаторы классифицируются также по сопловому узлу, так как от его конструкции зависит структура и качество покрытия. Они подразделяются на конструкции с центральным распыляющим соплом, закрытой схемой распыления и канального типа.

Конструкции металлизаторов с центральным распыляющим соплом наиболее простые и удобные в обслуживании и, в тоже время, позволяют получать покрытия с необходимым качеством для многих целей. Проволоки подаются в точку схождения и горения дуги по токоведущим направляющим (наконечникам) под углом около 30°. Распыляющий газ (обычно воздух) подается из центрального сопла. Ось потока газа лежит в плоскости осей токоведущих наконечников. Электрическая дуга стабилизируется в потоке газа. Важно добиться минимальной экранировки газового потока токоведущими наконечниками и следить за сходимостью проволок. Сходимость нарушается из-за износа каналов, по которым проходит проволока. Для уменьшения износа целесообразно использовать проволоку с полированной поверхностью и без поверхностных загрязнений. Требование по чистоте поверхности проволоки относится ко всем металлизаторам, вне зависимости от конструкции. Существенным фактором для стабилизации

электрической дуги является температура вылета проволоки. Принято называть вылетом проволоки ее отрезок от среза токоведущего наконечника до точки её плавления. Проволока нагревается от проходящего по ней тока и от тепла, выделяющегося в катодном или анодном пятне дуги. Температуру вылета проволоки можно регулировать длиной вылета проволоки. Длина вылета проволоки подбирается опытным путём для каждой проволоки и для каждой конструкции металлизатора. Расчётных зависимостей пока не существует.

Для схемы распыления с центральным соплом характерно наличие поперечной составляющей потока газа для поперечного срыва пятна дуги на конце проволоки (на обоих концах). Можно с высокой степенью достоверности предполагать, что эта составляющая негативно влияет на стабилизацию дуги и диспергацию материала проволок. При такой схеме истечения газа, газ имеет возможность рвать дугу не только где-то посередине между концами проволоки, но и на концах проволок, с которых горит дуга.

Для нанесения покрытий на внутренние поверхности иногда используют два газовых потока: один распыляет, а второй, расположенный на некотором расстоянии от дуги, поток заворачивает под некоторым углом (обычно 45° - 90°). Ось второго потока расположена в плоскости симметрии первого потока и токоведущих наконечников. Эту конструкцию можно отнести к схеме распыления с центральным соплом. Угол, под которым второй поток встречается с распыленным металлом, подбирается опытным путем. К недостаткам этой схемы можно отнести некоторое захолаживание потока распыленного металла и, как следствие, снижение коэффициента использования материала. В тоже время, происходит меньший нагрев подложки. Эта схема наиболее перспективна для нанесения покрытий на внутренние поверхности с малым диаметром.

Металлизаторы с закрытой схемой распыления. Так принято называть конструкцию металлизатора с диафрагмирующим колпачком. Колпачок, ввод воздуха (газа) под колпачок и расположение токоведущих направляющих,

являются основным конструктивным отличием данной схемы от предыдущей с центральным соплом. Эти отличия дают новое качество покрытия. Поток воздуха (газа) попадает сначала под колпачок, а затем, обжимая дугу и образующийся поток из газа и частиц металла, разгоняя его, вырывается наружу. Концентрация воздушного потока (его диафрагмирование) приводит к концентрации дуги (то есть пространства, занимаемого ею из условий её оптимального существования), к лучшей ее стабилизации, а также концентрации (фокусировке) потока напыления, состоящего из воздуха (газа) и частиц металла, направляющегося к подложке. Поток газа в диафрагма может быть не один, а два и более. Также могут быть дополнительные потоки газа за соплом (диафрагмой) для изменения геометрии потока. Концентрация потока напыления ведет к более равномерному прогреву напыляемых частиц металла и к более равномерной эпюре их скоростей в потоке. Следствием является повышение качества покрытий.

Металлизаторы сопловым узлом канального типа. В них распыляющий газ (воздух) подают вдоль токоведущих наконечников металлизатора. При этом сопловой узел существенно меняет свою конструкцию, становится более сложным в обслуживании. Однако, качество покрытия и производительность напыления возрастают. Газ подается вдоль наконечников по коаксиальным каналам. Поэтому эту схему распыления называли «канального типа». Газ симметрично истекает вдоль наконечников и, соответственно, вдоль проволок. На концах проволок поток газа истекает параллельно опорным участкам дуги, он не рвет дугу, а локализует, обжимая ее, на начальных участках ее горения. Основной столб дуги выдувается и растягивается потоком газа, имея возможность прерываться где-то посередине. Это приводит к росту напряжения на дуге и ее мощности, что позволяет плавить больше металла проволок, то есть увеличивается производительность напыления. Коаксиальное истечение газа приводит также к равномерному распылению материала проволоки в отношении дисперсности частиц. Частицы имеют небольшой разброс по размеру, в сравнении с другими схемами распыления. При такой схеме

распыления расширяется зона устойчивости дуги и тем самым, диапазон регулирования режимов напыления по току, напряжению и расходу газа.

Имеется довольно большое количество электродуговых металлизаторов зарубежных марок, таких как OSU-Hessler arcMould 130, OSU-Hessler 300 Двухтактный, OSU-Hessler 200 и 300 A LD / U-2, OSU-Hessler 300 A LDU-2 Push, OSU-Hessler 300 A antiCOR и OSU-Hessler 300 A LD / U-2EM. Они по сравнению с отечественными металлизаторами отличаются более лучшим дизайном, компактностью, легкостью и универсальностью.

1.7. Упрочнение методами электроискровой обработки

Использование электрической искры положено в основу метода электроискровой обработки металлических поверхностей (А.с. № 70010 от 03.04.1943г.), созданного советскими учёными супругами Б.Р. и Н.И. Лазаренко. Этот метод широко применяется в мировой практике для размерной обработки деталей в диэлектрической жидкости. Он широко востребован и развивается как в России, так и за рубежом для нанесения покрытий на детали в газовой среде с целью улучшения эксплуатационных свойств деталей машин, инструментов для механической обработки (резание, давление), литейной оснастки и др., а также для восстановления утраченных в процессе эксплуатации их размеров, устранения дефектов поверхности [10 – 24].

В результате обработки на поверхности детали образуется новый слой, которому в зависимости от параметров искрового разряда, состава электродного материала, материала обрабатываемой детали и других факторов придаются отличные от исходного состояния свойства, управляемые в широких пределах и обеспечивающие требуемые качества: повышенные микротвердость, износостойкость, жаростойкость и другие.

Универсальность электрической искры как технологического инструмента, характеризуемая широким диапазоном значений параметров покрытий (Таблица 1.3), дает возможность использовать одно и то же

оборудование для различных технологических целей и совмещать в одном цикле обработки различные технологические процессы.

Таблица 1.3 – Характеристики покрытий, нанесенных электроискровым методом

Характеристики покрытий	Значения
Толщина (мкм): – нанесённого слоя – белого слоя – переходного слоя	- 5–1000 до 600 до 700
Микротвердость (МПа): – белого слоя – переходного слоя	- 6000–22000 3000–8000
Параметры рельефа поверхности: – характер рельефа поверхности – высота микронеровностей (мкм) – относительная высота выступов h_v / r_v – относительное расстояние между выступами S_m / H_{max}	- выпукло-вогнутый Ra1,6–Rz360 0,06–0,19 5 - 9
Теплопроводность электродных материалов λ , (Вт/м·°K)	10–400

Многочисленные публикации в отечественной и зарубежной литературе по ЭИО свидетельствуют о высокой эффективности и универсальности метода, что приобретает особое значение в современных условиях для отечественных промышленных и ремонтных предприятий.

Широкое эффективное применение ЭИО базируется на основных двух его качествах:

1. Способности формировать на обрабатываемых изделиях покрытия (поверхностные слои) с заданными эксплуатационными свойствами путем применения большинства токопроводящих материалов с присущими им свойствами. Этим достигается увеличение износо-, жаро-, эрозионной-, коррозионной стойкости и улучшение других свойств обработанных поверхностей;

2. Возможности управления толщиной этих покрытий – от нескольких микрон до 0,5 мм (а при использовании определенных технологий – до 5–10 мм и более) путем изменения электрических режимов обработки и ее длительности.

Наряду с возможностью формирования покрытий с характеристиками широкого диапазона значений, метод ЭИО обладает также рядом достоинств, определяющих его успешное использование для решения производственных проблем:

- возможность локального формирования покрытий в строго указанных местах радиусом от долей миллиметра и более, не защищая при этом остальную поверхность;
- высокая адгезия электроискрового покрытия с основным материалом;
- отсутствие нагрева и деформаций изделия в процессе обработки;
- сравнительная простота технологии, не требуется специальной предварительной обработки поверхности;
- высокая надёжность оборудования и простота его обслуживания, оно малогабаритное и ремонтпригодное;
- низкая энергоёмкость ручных и механизированных процессов ЭИО;
- высокий коэффициент переноса электродного материала (60–80%).

1.8. Сущность электроискровой обработки

При ЭИО осуществляется воздействие на металлические поверхности в газовой среде короткими (10 – 2000 мкс) электрическими разрядами с энергией

от сотых долей до десятка и более джоулей и частотой до 1000 Гц. При периодическом, с определённой частотой, контакте электрода (анода) с обрабатываемым изделием (катодом) и его разрыве возникают электрические разряды, создаваемые генератором импульсов. Под действием высокой температуры в зоне разряда (5000 – 11000 °С) происходит следующее: идут процессы преимущественного разрушения материала электрода (анода) и образования вторичных структур в рабочей его части; осуществляется перенос продуктов эрозии электрода на деталь (катод); на поверхности обрабатываемого изделия протекают микрометаллургические и плазмохимические процессы; элементы материала электрода диффундируют в поверхностный слой изделия без существенного ее нагрева; поверхность изделия приобретает новый специфичный рельеф; образуется на поверхности изделия измененный слой, включающий белый слой, диффузионную зону и зону термического влияния, при этом изменяются свойства поверхностного слоя; формируется поверхностный слой мелкодисперсного состава, вплоть до наноуровня; происходит изменение размера изделия. Во вновь образованном рельефе отсутствуют протяженные выступы клинообразной в поперечном сечении формы, образованные обработкой резанием, которые заменяются выступами ограниченной длины, по форме близкими к шаровому сегменту, обладающими высокой несущей способностью; рельеф приобретает выпукло-вогнутый характер и его параметры одинаковы во всех направлениях.

Сам процесс ЭИЛ экологически чистый и безопасный, так как осуществляется при напряжении 20 – 100 В и длительности импульсных разрядов 10^{-6} – 10^{-2} с. При этом толщина формируемых слоев из твердых сплавов составляет ~ 0,01 – 0,15 мм, а из пластичных и более легкоплавких материалов слой покрытия может достигать 0,3 – 0,5 мм. В зоне разряда электроэрозия, массоперенос материала электродов (в паровой, жидкой и твердой фазах), кристаллизация и другие явления протекают в крайне неравновесных условиях способствующих образованию структур с мелким зерном, высокой плотностью дислокаций, с особым напряженно-

деформированным состоянием. Изменяя параметры и условия ЭИЛ, можно регулировать микрометаллургические и плазмохимические процессы в этой зоне, проводить направленный синтез тугоплавких и других химических соединений и формировать сложные композиционные покрытия из интерметаллидов, карбидов, нитридов, окислов, как за счет материалов электродов, так и элементов межэлектродной среды [20]

1.9. Технологии и области применения электроискровой обработки

Широкие пределы управляемых технологических параметров процесса ЭИО и характеристик формируемых покрытий являются основой высокой универсальности этого метода обработки, применяемого в прокатном производстве, в машиностроении при изготовлении новых деталей (упрочняющие покрытия и покрытия со специальными свойствами рабочих поверхностей прокатного инструмента, деталей машин, режущих инструментов, штамповой оснастки), а также в ремонтном производстве энергетических, добывающих и перерабатывающих, машиностроительных предприятий, предприятий легкой промышленности, агропромышленного комплекса, транспорта и других при восстановлении изношенных деталей, утративших свои размеры в процессе эксплуатации (восстанавливающие покрытия на наружных и внутренних поверхностях деталей и инструментов). Отметим, что в зарубежных странах этот метод используется в большей мере для нанесения покрытий с эффектом упрочнения и со специальными свойствами, причем, в первую очередь, в оборонных отраслях, в т.ч. при производстве космической и авиационной техники.

При назначении технологии нанесения упрочняющих электроискровых покрытий и последующей обработки учитываются условия работы объектов упрочнения (инструментов, деталей), т.е. факторы, инициирующие изнашивание их рабочих поверхностей. Обычно эти факторы – высокие давления, температуры, большая цикличность нагружения рабочих поверхностей и др. В этих случаях при упрочнении поверхностей обычно

применяются электроды из металлокерамических твердых сплавов типа ТК (Т5К10, Т15К6, Т30К4), ВК (ВК4, ВК6, ВК8), ТТК (ТТ7К12, ТТ21К10), СТИМ (СТИМ-2, -3Б, -3Б0Ан, -4, -50НА) и другие, включая содержащие нанодисперсные добавки, а также графиты мелкозернистой фракции. Результат двух- шестикратного увеличения ресурса достигается обычно покрытиями толщиной до 100 мкм. При этом особо привлекает применительно к резанию металлов факт значительного повышения эффективности упрочнения режущих инструментов при ужесточении режимов резания.

Для придания обрабатываемым поверхностям специальных свойств (жаро-, эрозионно-, коррозионная стойкость и др.) используют для ЭИО в качестве электродов токопроводящие материалы, обладающие соответствующими эксплуатационными свойствами. В частности, защищая поверхности деталей от атмосферной коррозии, используют электроды из алюминия, никеля, хрома и их сплавов, нержавеющей сталей; для снижения переходного электрического сопротивления наносят покрытия золотом, серебром, платиной и т.д.

Значителен объем использования ЭИО в технологиях восстановления изношенных деталей и при устранении брака, связанного с прослаблением размеров деталей при их изготовлении. Это чаще всего наружные и внутренние посадочные поверхности неподвижных соединений с диаметральным износом деталей до 500 мкм, а также деталей, работающих в условиях трения скольжения, с износом до 100 мкм. При восстановлении стальных деталей достаточно использования электродов из хромоникелевых сталей, а чугуновых – цветных сплавов на основе меди. Восстановление изношенных поверхностей инструментов выполняется электродами из высоколегированных и инструментальных сталей и твердых сплавов. Часто применяются многослойные покрытия, получаемые в несколько циклов обработки разными электродными материалами и обладающие при большей толщине повышенными эксплуатационными свойствами. Качественным уровнем современных ЭИ технологий для ремонтного производства является

обеспечение 100%-го ресурса восстановленных деталей (поверхностей), т.е. ресурса не ниже новых. Заметным и важным достоинством ЭИО для ремонтных целей является его технологическая мобильность, т.е. возможность без демонтажа с машин локального восстановления ответственных деталей, включая крупноразмерные.

Результатом практического использования ЭИО являются определённые показатели:

1. Увеличение срока службы упрочнённых деталей и инструментов на 250–400 % и более;
2. Уменьшение себестоимости и сокращение сроков ремонта агрегатов машин путем восстановления изношенных деталей взамен приобретения новых и обеспечение их ресурса на уровне нового изделия;
3. Окупаемость за три-девять месяцев капитальных затрат, связанных с приобретением новой техники (технологии и оборудование) и ее освоением;
4. Экономия природных ресурсов в связи с повторным использованием восстановленных деталей.

1.10. Перспективы ЭИ технологий

Наряду с совершенствованием существующих методов обработки металлических поверхностей для улучшения или восстановления их эксплуатационных характеристик также развивается ЭИО. Это развитие идёт в нескольких направлениях.

1. Создание новых электродных материалов со специальными свойствами. В России и за рубежом создают новые электродные материалы для ЭИО и исследуют свойства покрытий, полученных с помощью этих материалов. Это касается, например, твёрдых сплавов типа «СТИМ», в том числе с добавками наночастиц (разработки НПО «Металл» при НИТУ «МИСиС»), сплавов на основе карбидов титана, вольфрама, боридов и оксида циркония (Хабаровский научный центр ДВО РАН), силицидных материалов (Институт физики твёрдого тела РАН и ФГБНУ ГОСНИТИ), твёрдых сплавов с

тугоплавкими и высокотвёрдыми добавками (Институт проблем материаловедения НАНУ – Украина) и др. Использование для ЭИО новых электродных материалов способствует большему переносу легирующих элементов на обрабатываемую поверхность, улучшению качественных характеристик покрытия и увеличению ресурса упрочняемого или восстанавливаемого изделия, создавая этим новые перспективы для эффективного применения ЭИО.

2. Механизация и автоматизация процесса обработки. Это направление включает также роботизацию процесса, оно эффективно в условиях серийного и крупносерийного производства, а также при обработке ответственных деталей сложной и дорогостоящей техники, обеспечивая стабильность и качество нанесения покрытий на выбранных режимах.

Механизированное оборудование для ЭИО (установки «Элитрон-120», -122», -240», -345», -347», -349», -440», -502», -503» для обработки, соответственно, режущего инструмента осевой формы, разделительных штампов, серебрения электрических контактов, сегментных пил, деталей типа тела вращения, валков прокатных станов, плоских поверхностей форм производства силикатного кирпича, фильер, штампов горячей штамповки с осесимметричной гравюрой и другие) применялось в СССР в различных отраслях, в т.ч. в машиностроении и ремонтном производстве. В настоящее время, наряду с совершенствованием генераторов искровых импульсов и электрод-инструментов, это направление интенсивно развивается в промышленно развитых странах, например, фирмой «ASAP» – США.

3. Применение многоконтурной обработки. Этот технический прием связан с механизацией ЭИО, подразумевает одновременную обработку одной единицей оборудования нескольких участков одного или нескольких изделий. Применение такого приёма направлено на увеличение производительности обработки. Обычно обработка всеми контурами ведётся по одной технологии, т.е. на одних и тех же электрических режимах. Примером служит установка «Элитрон-440», созданная в начале 1990-х гг. Опытным заводом Института

прикладной физики Академии наук Молдавии для упрочнения плит прессформы производства силикатного кирпича. Эта установка обеспечивала возможность одновременной работы восьми контуров, т.е. восьми электрод-инструментов, по параллельной обработке двух плит, с соответствующим увеличением производительности обработки.

4. Создание комбинированных покрытий совмещением ЭИО с другими методами обработки. Резервы эффективности ЭИ технологий связаны также с совместным использованием ЭИО и других методов обработки. Так, ЭИО с поверхностно-пластическим деформированием улучшает качество поверхности и преобразовывает растягивающие напряжения в поверхностном слое на сжимающие. Совмещение ЭИО с детонационным напылением, лазерной, ультразвуковой, плазменной и другими видами обработки улучшает качественные параметры покрытий, позволяет решать технические проблемы более эффективно. Интерес представляют также успешно применяемые ГОСНИТИ технологии восстановления изношенных деталей, включающие ЭИО и холодное газодинамическое напыление или ЭИО и металлополимерные покрытия. При таком совмещении методов на деталях получают покрытия значительной толщины с высокой несущей способностью и контактной сплошностью. Обычно их применяют для восстановления сильно изношенных посадочных поверхностей неподвижных соединений.

Широкое и эффективное использование на производстве ЭИ метода обработки металлических материалов подтверждает сказанные еще в 1947 г. слова Б.Р. Лазаренко, открывшего миру для практического применения электрическую искру: «Многовековое царствование механического способа обработки металлов, перевернувшего мир в прошлых столетиях, – кончается. Его место занимает, несомненно, более высокоорганизованный процесс, когда обработка металла производится электрическими силами... Ему будет принадлежать будущее, и притом – ближайшее будущее».

1.11. Оборудование для электроискровой обработки

Процесс ЭИО реализуется с помощью установок, которые в зависимости от конструкции позволяют наносить покрытия в ручном, механизированном или автоматизированном режимах. Это широкий класс оборудования разных наименований, моделей, технических характеристик и стоимости. Его выпускают и эффективно используют во многих технически развитых странах мира[1].

В советский период при плановой экономике метод ЭИО был предметом исследований многих НИИ и отраслевых институтов, эффективно применялся предприятиями практически всех отраслей народного хозяйства. Опытным заводом ИПФ АН МССР, который фактически являлся головным предприятием в Советском Союзе по выпуску установок ЭИО, были разработаны совместно со специалистами ИПФ около 50 различных моделей установок ЭИО типа ЭФИ и Элитрон (Рисунок 1.2).



Элитрон-17



Элитрон-22А



Элитрон-52Б



Элитрон-120А
(упрочнение режущих
инструментов осевой формы
типа сверл, разверток)



Элитрон-501
(упрочнение вставок
штампов горячей
штамповки)



Элитрон-181А
(упрочнение сверловых
ножей)



Элитрон-502А
(упрочнение
твердосплавных волок)



Элитрон-240А
(серебрение электрических
контактов)



Элитрон-ТСП
(ЭИО наружных поверхностей
вращения)

Рисунок 1.2. Ручные и механизированные установки ЭИО Опытного завода
ИПФ АН МССР (разработки 70-80 годов XX века)

Следует подчеркнуть, что создание этих установок базировалось на успешном использовании ЭИО при решении конкретных технических задач и повышенном спросе производства. К сожалению, после распада Советского

Союза все виды указанных установок исчезли и на сегодня их никто не продает.

На рисунке 1.3 приведены некоторые другие примеры отечественного и зарубежного ЭИ оборудования.



Рисунок 1.3. Некоторые другие примеры отечественного и зарубежного ЭИ оборудования

Надо обратить внимание на то, рассмотренные электроискровые установки ручного варианта. Необходимо также указать, что по приобретению электроискровых установок на сегодня Интернет предлагает только аппарат

для электроискрового нанесения карбида вольфрама DEPOSITRON 820 стоимостью более 300 тысяч рублей.

Выводы по главе 1

1. Процесс электродуговой металлизации известен давно и, начиная с 50-х годов прошлого столетия, широко применяется для антикоррозионной защиты металлоконструкций. Он используется как в машиностроительном, так и в ремонтном производстве. С учетом, что задачей НКР были вопросы восстановления деталей сельскохозяйственных машин с заданными физико-механическими свойствами, основной упор в работе необходимо сделать на исследовании и применении электроискрового разряда.

2. Электроискровой метод нанесения металлопокрытий обладает высокой эффективностью, экономичностью и универсальностью; он перспективен для широкого использования на предприятиях разных отраслей экономики, включая оборонную промышленность, для увеличения ресурса и восстановления работоспособности деталей и инструментов.

3. Наличие сложных электрофизических и электрохимических процессов при электроискровой обработке поверхностей с электродами из различных материалов в различной газовой среде и в присутствии различных легирующих твердосплавных порошков создает предпосылки для проведения широкомасштабных НИОКР, как по самим технологическим процессам электроискровой обработки, так и по разработке более совершенных устройств электроискрового легирования.

Глава 2. Теоретические аспекты исследований технологий дуговой металлизации и электроискровой обработки

В технологиях дуговой металлизации и электроискровой обработки основным рабочим инструментом, определяющим технологический процесс, является плазменная среда дугового и электроискрового разрядов. Поэтому, получение конечного продукта по упрочнению поверхностей деталей различных изделий с заданными физико-механическими свойствами, в первую очередь, зависит от происходящих электрофизических и электрохимических процессов в самой плазменной среде этих разрядов. Эти процессы являются сложными металлургическими и плазмохимическими процессами, происходят при температурах более десятков тысяч градусов с образованием различных твердосплавных элементов с необычными свойствами, в различных газовых средах и с различными составами материала электродов. Вследствие этого разработка единой математической модели получения желаемого продукта с применением плазменных технологий является сверхсложной задачей. На это налагает еще дополнительную задачу то обстоятельство, что различные разряды обладают различным спектром энергетических, тепловых и газодинамических характеристик. Все это вместе взятое на сегодня в теоретическом плане позволяет решать только частные задачи данной проблемы, например, исследование самих процессов, происходящих в плазменной среде, или исследование характеристик продуктов плазменного напыления, или же исследование свойств упрочненных поверхностей деталей. В связи с этим в данной главе НКР рассмотрим только некоторые вопросы, связанные с указанными частными задачами.

2.1. Физические процессы при напылении дуговой металлизацией

Процесс дуговой металлизации включает в себя ряд последовательных этапов, среди которых основными являются:

- распыление электродных проволок; создание несущего потока распыленных частиц с высокой температурой и скоростью;

- торможение несущего потока и частиц перед напыляемой основой;
- соударение частиц с основой или напыленным слоем;
- растекание жидких частиц или их компонентов;
- охлаждение, отвердевание, кристаллизация частиц;
- диффузия материала частиц в основу и противоположный процесс проникновения материала основы в покрытие [25, 26].

В процессе транспортирования распыленных частиц на поверхность основы происходит дробление частиц в результате:

- волновой неустойчивости поверхности капли (число Вебера в процессах плазменного напыления в 10...100 раз больше критического);
- перепада давления газового потока от точки торможения в центре поверхности частицы до периферии, в результате чего частица может деформироваться и разрушаться;
- сдува жидкой пленки с поверхности расплавляющейся частицы с эффектом образования пузырьковой конфигурации;
- вращения частицы, при котором могут возникать центробежные силы, разрушающие жидкую частицу [26].

Кроме того, дробление частиц распыленного материала вызывается раскалыванием или разбрызгиванием капель при соударении с поверхностью. При движении частиц в струе возможны испарение и окисление их материала, а при малой тепловой мощности струи – нерасплавленное состояние [27].

Перед соударением с основой происходит торможение газовой и дисперсной фаз. Торможение газовой фазы приводит к переводу кинетической энергии в тепловую энергию приводящее к увеличению энергии частиц. Торможение частиц приводит к перераспределению их скоростей в зависимости от размеров – особенно сильно тормозятся мелкие частицы. Первыми на поверхность обязательно приходят частицы, имевшие перед торможением максимальную скорость.

В результате описанных процессов транспортируемые распыленные частицы металла деформируются при ударе о поверхность и соединяются с ней.

Многократное повторение этого процесса приводит к формированию покрытия, причем, на поперечном шлифе покрытий появляется слоистость. Имеется анизотропия микроструктуры покрытия: длина и ширина частиц покрытия на порядок превышают их толщину в направлении, перпендикулярном к границе с основой. Недостаточная пластичность частиц при напылении приводит к образованию пор на стыках между частицами. Вследствие этого поры имеют неправильную форму, их размеры могут достигать 60 мкм [25]. Пористость покрытий, нанесенных при одинаковых режимах, может значительно различаться (в 2 и более раз) вследствие вариаций химического состава, физико-механических свойств электродных материалов и технологии нанесения покрытий. Обычно пористость для газотермических покрытий составляет 4...25 % [28].

Напыленные частицы соединяются между собой по контактными поверхностям сварными участками. Сварные участки не заполняют всю площадь контакта (или контактной поверхности) между частицами, что приводит к тому, что прочность покрытий ниже прочности материала покрытия в компактном состоянии. При формировании покрытия имеют место два типа взаимодействия: адгезионное – между напыленными частицами и поверхностью основного металла и когезионное – частиц друг с другом.

Прочность соединения покрытия с основой является основным критерием качества покрытий [28, 29]. Какими бы свойствами ни обладал материал покрытия, недостаточная прочность его соединения с основой сводит на нет все усилия по его получению. Прочность соединения покрытия с основой, в свою очередь, определяется параметрами границы раздела между ними.

Граница раздела между слоями, сформированными за один проход распылителя, образуется вследствие различной длительности процессов нанесения частиц в каждом слое и между слоями [28]. За промежуток времени между нанесением предыдущего и последующего слоев на поверхность покрытия осаждаются пылевидные фракции распыляемого материала или его

окислов, происходит адсорбция газов из окружающей атмосферы. Наибольшую толщину адсорбированного слоя имеют межслойные границы и граница между покрытием и основным металлом. Вторая причина появления этих границ заключается в интенсивном остывании напыленного слоя перед нанесением последующего [28, 29]. Это приводит к тому, что частицам последующего слоя не удастся полностью проплавить оксидную пленку предыдущего слоя.

Величина прочности соединения покрытия с основой в различных случаях объясняется молекулярным, донорно-акцепторным и механическим взаимодействием, а также изменением энергетического и структурного состояния наносимого и основного металлов [25, 30]. Определяемая при испытаниях прочность соединения обусловлена суммарным действием перечисленных факторов.

Для покрытий, не подвергшихся оплавлению и нанесенных при оптимальных режимах, величина прочности соединения с основой, оцененная методом отрыва конусного штифта, составляет 20...100 МПа [28].

Существенным недостатком традиционного способа газотермического напыления является наличие в покрытиях остаточных растягивающих напряжений. Эти напряжения в покрытиях, складываясь с рабочими напряжениями, дополнительно нагружают деталь и могут вызвать преждевременный выход ее из строя. Этому способствует то, что величина напряжений достигает таких значений, при которых происходят растрескивание покрытий и, в некоторых случаях, отслоение. Значения остаточных напряжений зависят, в первую очередь, от технологии напыления, обуславливающей тепловой режим, структуру и состав покрытий. При математическом моделировании учет коэффициентов термического расширения, модулей упругости компонентов и влияние на них температурных факторов сложны, вследствие чего согласование свойств материалов покрытия и основы не позволяет избежать появления остаточных растягивающих напряжений. Трещины распространяются перпендикулярно поверхности основы, проходят через несколько частиц или через все покрытие. Известно

[28], что такие покрытия находятся под действием остаточных растягивающих напряжений независимо от их толщины, а величина этих напряжений увеличивается линейно по отношению к толщине. Рост напряжений приводит к отслоению покрытий, особенно тех, которые имеют низкую прочностью соединения с основой.

Таким образом, формирование покрытий при дуговой металлизации будет сопровождаться высокими остаточными растягивающими напряжениями, пористостью и анизотропией свойств покрытий, что не обеспечивает необходимую надежность деталей, особенно в ответственных и высоконагруженных узлах. Эти обстоятельства требуют учета этих факторов при математическом моделировании процесса дуговой металлизации.

2.2. Анализ условий повышения качества покрытий при дуговой металлизации

Процесс плазменного напыления включает в себя ряд последовательных этапов воздействия на напыляемый материал [25, 26]. В процессе транспортирования в плазменной струе происходит дробление частиц [26]. При этом возможны испарение и окисление материала частиц, а при малой тепловой мощности струи – их нерасплавленное состояние [27].

При взаимодействии с поверхностью частица вначале принимает определенную геометрическую форму, затем уже начинается ее теплообмен с основой. Это объясняется тем, что время расплывания частицы значительно меньше времени выравнивания температуры частицы за счет теплопроводности. Это условие нарушается лишь для частиц с размером менее 0,1 мкм. Таким образом, динамика взаимодействия частицы и основы определяет область их физического контакта, а теплофизика – условия прочностной связи между ними [26].

Процесс соударения частицы с подложкой сопровождается преобразованием кинетической энергии частицы в тепловую энергию. С увеличением жесткости подложки растет степень этого преобразования. При

этом характер расплавления частицы (если она не была расплавлена перед соударением) практически не зависит от температуры подложки [31].

В момент удара об основу в частице от поверхности контакта начинают распространяться ударные волны, за которыми происходит сжатие вещества, нагрев, увеличение давления, изменение скорости движения. После отражения от свободной поверхности частицы волна разгрузки возвращается на контактную поверхность. Если частица не успевает достаточно прочно соединиться с поверхностью основы, то она от нее отскакивает [26].

При ударе частицы об основу на контактной поверхности возникает большое импульсное давление ($\approx 10^{10}$ Па). Предполагается, что этот эффект ответственен за аномальную диффузию материалов – вместо оценочных нескольких единиц микрометров зона взаимного диффундирования материалов наблюдается на расстояниях от поверхности контакта в сотни раз большие. Это, возможно, происходит вследствие перетекания материала по межзеренным границам и другим дефектам внутренней структуры.

Для описания степени связи частиц с поверхностью в настоящее время наибольшее распространение получила теория, основанная на топохимической реакции [25, 26], которую можно представить уравнением:

$$\frac{dN}{dt} = (N_0 - N) \cdot v \cdot \exp \left[-\frac{E_a}{k \cdot T_k} \right]. \quad (2.1)$$

Предполагается, что отношение N/N_0 отвечает отношению прочности соединения σ_c/σ_{cm} .

Наилучшие условия для напыления имеются тогда, когда помимо высокой скорости химической реакции в зоне контакта между частицей и подложкой одновременно обеспечивается высокая диффузия вакансий.

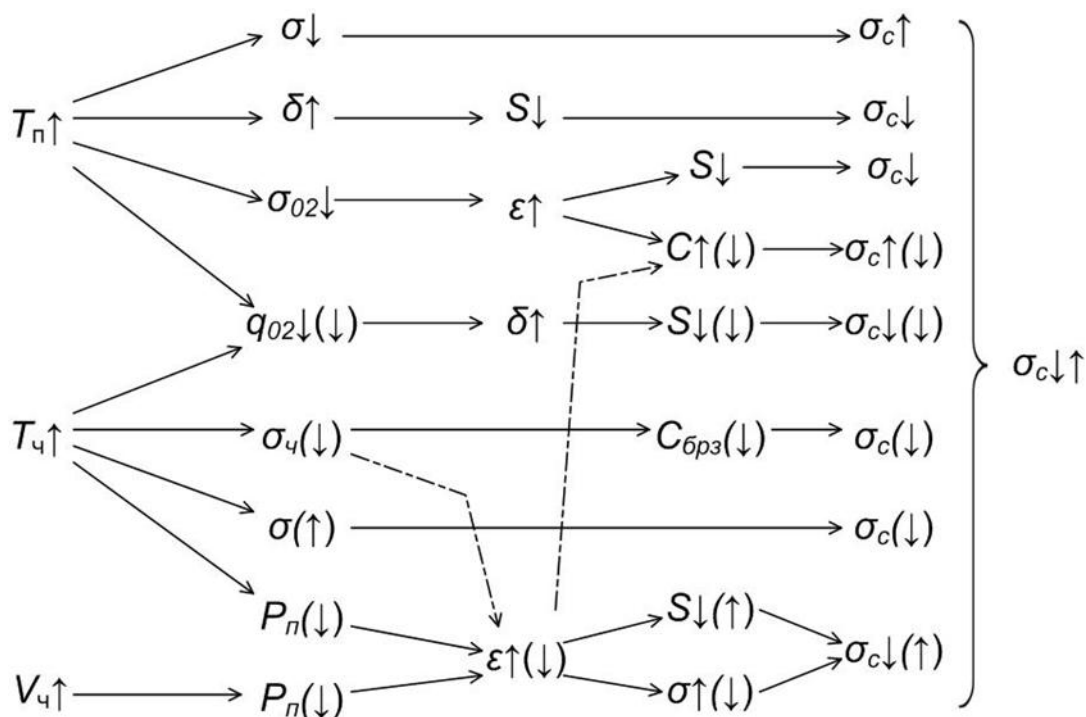
Из зависимости (2.1) видно, что усиление протекания химической реакции между частицей и основой определяется уменьшением энергии процесса E_a и увеличением контактной температуры T_k . Активация реакции

может быть достигнута различными способами – термическим, механическим, от пластической деформации, химическим [32]. Активация по термическому каналу осуществляется за счет повышения контактной температуры T_k с помощью нагрева подложки и частицы. Активация по механическому каналу реализуется механическим воздействием, позволяющим частично или полностью разрушить окисный или химически адсорбированный слой кислорода. Канал активации от пластической деформации связан с высвобождением энергии, образующейся при выходе на поверхность структурных дефектов типа дислокаций, вакансий, межузельных атомов. Химический канал осуществляется с помощью какого-либо вещества путем проведения восстановительной реакции, в результате которой оксид металла восстанавливается до чистого металла.

Если в процессе взаимодействия напыляемой частицы с подложкой пластическая деформация последней не происходит или происходит при действии импульсного давления, то их соединение осуществляется за счет термической активации.

Если же имеет место пластическая деформация материала подложки (под действием импульсного и напорного давлений), то взаимодействие между атомами в зоне контакта частицы с подложкой происходит по типу механической активации и активации, связанной с высвобождением энергии при выходе структурных дефектов на поверхность подложки [25, 32 – 34].

Физико-механические характеристики покрытия определяются энергетическими параметрами подложки и частиц [25, 32 – 34]. Это влияние сложное и неоднозначное. Так, например, прочность соединения σ_c частицы с подложкой может схематически зависеть от скорости частицы $V_{\text{ч}}$, температур частицы $T_{\text{ч}}$ и подложки $T_{\text{п}}$ согласно рисунку 2.1 [32, 35]. Из этого рисунка видно, что повышения $T_{\text{п}}$, $V_{\text{ч}}$ и $T_{\text{ч}}$ оказывают конкурирующее влияние на процессы формирования покрытия и его соединения с подложкой, и поэтому можно ожидать как увеличения, так и уменьшения прочности этого соединения σ_c .



стрелки $\uparrow, \downarrow, \Rightarrow$ означают соответственно увеличение; уменьшение и направление влияния, стрелки в скобках $(\uparrow), (\downarrow)$ – принадлежность к влиянию $T_{\text{ч}}$

Рисунок 2.1 – Схема причинно-следственной связи влияния температуры подложки $T_{\text{п}}$, скорости $V_{\text{ч}}$ и температуры частиц $T_{\text{ч}}$ при плазменном напылении на параметры процесса образования соединения покрытия с подложкой

Влияние скорости $V_{\text{ч}}$ и температуры частиц $T_{\text{ч}}$, а также температуры подложки $T_{\text{п}}$ на прочность при плазменном напылении реализуется через промежуточные влияния. Температура подложки $T_{\text{п}}$ определяет прочность соединения покрытия с подложкой σ_c через непосредственное влияние на величину остаточных напряжений в материале подложки σ , толщину слоя оксида δ , условный предел текучести материала подложки σ_{02} , теплоту образования оксида или теплоту адсорбции q_{02} , а также через площадь активного центра S (локальную область зоны вокруг ядра дислокаций, в

которой уровень энергетического состояния атомов обеспечивает условия разрыва межатомных связей Me-O), локальную пластическую деформацию подложки ε , число образованных активных центров C .

Температура $T_{\text{ч}}$ и скорость $V_{\text{ч}}$ частиц определяют прочность соединения покрытия с подложкой σ_c дополнительно через непосредственное влияние на поверхностное давление частиц при соударении с подложкой $P_{\text{п}}$, число образованных активных центров после разбрызгивания частиц при ударе о подложку $C_{\text{брз}}$, силу поверхностного натяжения частицы $\sigma_{\text{ч}}$.

Результаты экспериментов [32], проводимых для подложек из релаксационных материалов, показывают, что при $T_{\text{п}} = \text{const}$ повышение $V_{\text{ч}}$ приводит к увеличению величины σ_c . Это свидетельствует о том, что физические процессы, приводящие к повышению параметра σ_c , более влиятельны, чем процессы, приводящие к его снижению. Повышение скорости $V_{\text{ч}}$ при $T_{\text{п}} = \text{const}$ для материалов подложек с низкой релаксационной способностью может приводить к обратному эффекту, и в этом случае значение $V_{\text{ч}}$ должно согласовываться с параметром $T_{\text{п}}$, которое определяет величину скорости релаксации напряжений, а следовательно, и уровень остаточных напряжений σ в деформируемом материале.

Повышение температуры частицы $T_{\text{ч}}$ приводит к увеличению контактной температуры (уменьшению теплоты образования оксида или теплоты адсорбции $q_{\text{о2}}$), но при этом увеличивает время охлаждения частицы, затрудняет обеспечение высоких скоростей ее охлаждения и не позволяет получить мелкозернистую и аморфную структуру покрытия, что способствует накоплению остаточных напряжений σ в материале подложки [33, 34] и снижению прочности соединения покрытия с подложкой.

При повышении температуры расплавленных частиц $T_{\text{ч}}$ вследствие уменьшения их плотности падает импульсное и напорное давление $P_{\text{п}}$ при соударении с подложкой. Это вызывает противоположный эффект в сравнении с повышением скорости частиц $V_{\text{ч}}$. Кроме того, перегрев расплавленных частиц уменьшает их поверхностное натяжение $\sigma_{\text{ч}}$ и приводит к разбрызгиванию

капель при соударении с подложкой (уменьшается число образованных активных центров C) и уменьшению деформации в зоне контакта ε .

Несмотря на сложность и неоднозначность влияний энергетических параметров частиц ($V_{\text{ч}}$, $T_{\text{ч}}$) и температуры подложки $T_{\text{п}}$ на прочность покрытия, многие исследования позволяют сделать некоторые выводы об оптимизации этих параметров, основными из которых являются нижеперечисленные.

а) При интенсивном расплющивании частиц в процессе их соударения с подложкой (когда они расплавлены и очень пластичны) на большей площади контакта в кольцевой зоне активирование подложки осуществляется растекающимся слоем частицы, а роль ударного и напорного давления менее существенна [33].

Это может быть объяснено наличием зон интенсивного течения металла частицы в процессе соударения. Скорости поперечного растекания радиальных струй капли при ударе значительно (2...6 раз) выше скорости самого удара [33, 34]. Причем, чем ниже скорость удара, тем выше относительная скорость растекания. При растекании частицы возникают высокие динамические напряжения, превышающие предел текучести материала поверхностного слоя детали, которые и приводят к интенсивному механическому активированию.

б) При напылении твердыми или слабо деформируемыми частицами площадь контакта их с подложкой по сравнению с исходными размерами меняется мало, напорное и ударное давление воздействует на всю область контакта. В этом случае превалирует вклад ударного и напорного давлений в образовании соединения частицы с основой. Следовательно, в обоих случаях ведущая роль в формировании покрытий принадлежит явлениям пластической деформации [33].

в) При скоростях удара частиц о подложку, не обеспечивающих резко-го увеличения напряжения в контактной зоне при постоянной контактной температуре, относительная прочность соединения невысока. Это связано с малым временем соударения и, тем самым, с малым периодом активации поверхности контакта. При повышении скорости частиц, начиная с

критического значения $V_{кр}$, роль механического (термического) фактора возрастает и относительная прочность сцепления начинает увеличиваться [33].

г) Минимальная скорость расплавленных частиц $V_{ч\ min}$, необходимая для их деформации при ударе, может быть оценена по формуле [34]

$$V_{ч\ min} \approx \sqrt{\frac{2\sigma_{ж}\left(\frac{d_{ч}}{h_{ч}} - 3\right)}{\rho_{ж} \cdot d_{ч}}}. \quad (2.2)$$

д) Пороговое значение скорости частиц $V_{ч\ lim}$ определяется из условия

$$\sigma_B^c < P_y,$$

где ударное давление в частице при ударе о подложку P_y определяется, согласно работе [34], выражением

$$P_y = \frac{V_{ч} \cdot \rho_{ч}(T_{ч}) \cdot C_{ч}(T_{ч})}{\left(1 + \frac{\rho_{ч}(T_{ч}) \cdot C_{ч}(T_{ч})}{\rho_{п}(T_{п}) \cdot C_{п}(T_{п})}\right)}.$$

Из этого условия имеем [34]

$$V_{ч\ lim} = \frac{\sigma_B^c \left(1 + \frac{\rho_{ч}(T_{ч}) \cdot C_{ч}(T_{ч})}{\rho_{п}(T_{п}) \cdot C_{п}(T_{п})}\right)}{\rho_{ч}(T_{ч}) \cdot C_{ч}(T_{ч})}. \quad (2.3)$$

Например, для материала Al_2O_3 предел прочности $\sigma_B^c = 2940$ МПа и $V_{ч\ lim} = 351$ м/с. Для других материалов пороговое значение скорости частиц имеет тот же порядок. Следовательно, для дозвуковых плазмотронов целесообразно достижение максимально возможных скоростей частиц.

е) В работе [34] даются рекомендации по выбору скорости частиц. В случае напыления на пластичную поверхность хрупких материалов ограничения в скорости частиц для первых слоев покрытия лимитируются допустимой глубиной их внедрения, удовлетворяющей обычно условию $h_{ч} < 0,5 d_{ч}$. Температура частиц при этом должна превышать температуру, соответствующую хрупко-вязкому переходу материала основы. При формировании последующих слоев, когда напыляемые частицы соударяются с

уже ранее нанесенными затвердевшими слоями, пороговое значение оценивается по формуле (2.3).

При нанесении на поверхности из твердых хрупких материалов первых слоев покрытий из пластичных металлов пороговое значение скорости частиц необходимо оценивать по формуле (2.3). Для последующих слоев необходимо соблюдать условия $h_{\text{ч}} < 0,5 \cdot d_{\text{ч}}$; $h_{\text{ч}} < 0,5 \cdot H_i$ и скорость частиц рассчитывать по формуле (2.2).

ж) Повышение скорости частиц способствует достижению эффекта мгновенного переохлаждения расплава и формированию мелкодисперсной структуры покрытия. Для получения аморфной структуры покрытия следует избегать перегрева частиц выше температуры плавления [36].

Аморфные покрытия по сравнению с покрытиями, имеющими кристаллическую структуру, обладают в 1,3...1,5 раза более высокой прочностью соединения с основой, износостойкостью, характерной для твердых сплавов, повышенным пределом усталости по сравнению со стальной основой без покрытия в среднем на 25...40 % [36].

з) При высоких расходах расплавленных частиц и умеренном подогреве подложки высокая прочность соединения покрытий может быть объяснена многократным протеканием процессов физико-химического взаимодействия материалов по контактными границам [33]. Таким образом, целесообразно загружать плазменную струю интенсивным потоком напыляемого порошка.

и) Имеется существенное влияние размера частиц на прочность соединения. При постоянной скорости частиц уменьшение их диаметра приводит к снижению времени соударения и, соответственно, прочности соединения с основой [33]. Это позволяет предположить, что дробление частиц уменьшает время соударения и приводит к увеличению прочности соединения только при скоростях, превышающих 1000 м/с. Наиболее благоприятные условия формирования прочного покрытия в этой связи создаются при коагуляции частиц в плазменной струе.

к) При относительно высоких скоростях соударения (более 400 м/с) прочное соединение образуется на всей площади контакта частиц с поверхностью, в том числе и на периферийном кольцевом участке [33, 34].

Таким образом, вследствие множества факторов процесса напыления и их конкурирующего влияния на критерии процесса, формирование покрытия заданного качества представляет собой сложную проблему. Можно предположить, что решение этой проблемы и получение заданных физико-механических характеристик покрытия могут быть обеспечены при выполнении следующих условий:

- при оптимальной температуре подложки, большей определенного экспериментально найденного значения, и меньшей температуры структурных превращений;
- при размерах частиц, имеющих малый фракционный разброс; при этом дробление в процессе напыления нежелательно;
- при минимальной степени окисления частиц;
- при температуре частиц, соответствующей минимальному перегреву относительно температуры плавления;
- для скорости частиц, близкой к наибольшему значению, которое приближенно можно оценить по формуле (2.3). В случае использования дозвуковых плазмотронов скорость частиц должна быть максимально возможной. Кроме того, с уменьшением размера частиц целесообразность повышения их скорости возрастает. Для того чтобы мелкодисперсные частицы имели в момент соударения скорость $V_{ч\text{ lim}}$, их необходимо разогнать в плазменной струе до более высоких скоростей с учетом торможения газовым потоком перед подложкой и более быстрого остывания в сравнении с частицами среднего и крупного размера.

Таким образом, для качественного формирования покрытия необходима организация высокоскоростного источника расплавленных напыляемых частиц в газовой среде с нейтральным или восстановительным потенциалом. При этом необходимо учесть особенности динамики потока, массу и скорость

напыляемых частиц, их энергетические и скоростные характеристики, температуру подложки.

2.3. Физические процессы при электроискровой обработке

Изменение свойств поверхностных слоев из металла возможно двумя способами: изменением их химического состава, либо изменением структуры слоя под влиянием внешнего энергетического воздействия различными методами (механическими, тепловыми, энергетическими или их комбинациями), включая метод электроискровой обработки (ЭИО).

Этот метод, известный под названием «электроискровое легирование», основан на явлении электрической эрозии при искровом разряде материала анода и его полярного массопереноса на катод-деталь [37]. При этом на поверхности обрабатываемой детали формируется слой, состоящий из материала катода, модифицированного частицами материала анода и межэлектродной среды. Фазовый состав и структура покрытия, сформированного при ЭИО, определяются составом и свойствами материалов легирующих электродов и технологическими режимами обработки.

Формирование упрочненного поверхностного слоя и покрытия при ЭИО происходит в результате сложных плазмохимических, теплофизических и механотермических процессов, происходящих на локальных участках поверхности обрабатываемой детали под воздействием энергии искрового разряда. При сближении легирующего электрода-анода с обрабатываемой поверхностью детали происходит искровой разряд длительностью 10^{-6} - 10^{-2} с. В результате, на поверхностях анода и катода возникают локальные очаги плавления и испарения материала, вызывающие их электрическую эрозию и взаимный массоперенос. В процессе обработки на поверхности детали формируется тонкое покрытие с определенными физико-механическими свойствами. Параллельно действующее импульсное тепловое воздействие вызывает ряд механотермических процессов, приводящих поверхностные слои электродов в сложнапряженное состояние вплоть до их пластической

деформации и хрупкого разрушения. Поскольку электроды при искровом разряде находятся между собой в кинематической связи, то наряду с тепловым воздействием обрабатываемая поверхность детали подвергается ударно-вибрационному воздействию. При каждом контактном взаимодействии электродов образуются и разрушаются микролокальные мостики сварки, вызывающие совместно с механическим ударно-вибрационным воздействием пластическую деформацию модифицируемых поверхностных слоев. Такое энергетическое воздействие с высокой плотностью мощности стимулирует развитие в условиях электроискровой обработки микрометаллургических процессов (термохимических, газодинамических, диффузионных).

Поверхностный слой, сформированный при ЭИО, представляет собой новую композиционную структуру. Верхний тонкий слой состоит из материала анода, модифицированного элементами материала катода и межэлектродной среды. Сплошность и толщина данного слоя зависят от структуры материала легирующего элемента (ЛЭ), режимов и времени обработки.

Под верхним слоем располагается модифицированный упрочненный слой, состоящий из смеси материалов анода и катода, образующийся в результате конденсации ионно-плазменной и капельной фазы и диффузии химических элементов материала анода в материал катода. Под ним располагается самый нижний и наибольший по толщине слой, образованный в результате импульсного теплового воздействия (зона термического влияния). Его структура отличается от структуры материала обрабатываемой детали строением и зернистостью. С перемещением вглубь данная структура переходит в структуру основного материала [38].

Таким образом, модифицирование и упрочнение поверхностного слоя происходит благодаря следующим процессам [39]:

- осаждение (конденсация) материала анода на поверхности катода;
- диффузия частиц материала анода в поверхностный слой материала катода;
- образование твердых растворов и химических соединений (оксиды, карбиды, интерметаллиды);

- образование зоны взаимной кристаллизации Me_1 и Me_2 , неравновесных структур, фаз, а также мелкозернистой структуры.

2.4. Термодинамическая модель процесса структурной модификации при ЭИО

Процесс образования концентрированного потока электронов при электрическом разряде и его взаимодействия с металлами можно представить в виде структурной схемы термодинамических процессов в системе «легирующий электрод (анод) - обрабатываемая деталь (катод)» (Рисунок 2.2).

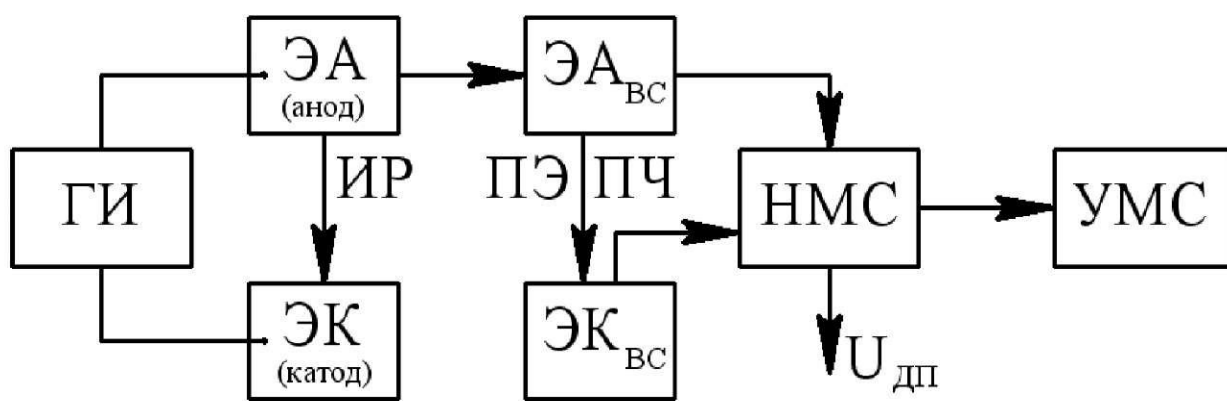


Рисунок 2.2 - Структурная схема термодинамических процессов при ЭИО: ГИ - генератор импульсов; ЭА - анод в исходном состоянии; ЭК - катод в исходном состоянии; ИР - искровой разряд; ПЭ - поток электронов; ПЧ - поток частиц; ЭА_{ВС} - анод в возбужденном состоянии; ЭК_{ВС} - катод в возбужденном состоянии; НМС - неустойчивая модифицированная структура; УМС - устойчивая модифицированная структура

В настоящее время единой общепринятой физической модели процесса электроискровой обработки не существует. Физическая суть метода заключается в том, что при сближении двух электродов напряженность электрического поля возрастает и при малом зазоре между ними возникает искровой электрический разряд (ИР). По возникшему каналу сквозной проводимости пучок электронов (ПЭ) устремляется к поверхности

металлического катода (ЭК). Кинетическая энергия заторможенных электронов выделяется в поверхностных слоях анода, переводя его в возбужденное состояние (ЭА_{ВС}). При этом, плотность тока возрастает и значительно превосходит критическую, при которой металл анода плавится. Система резко освобождает энергию и из анода выделяются мелкие капли металла и с высокой скоростью летят на катод. Одновременно капли нагреваются, закипают и «взрываются», образуя поток еще более мелких частиц (ПЧ), которые достигая поверхности катода, образуют сильные адгезионные связи и частично диффундируют на незначительную глубину, модифицируя тонкий поверхностный слой. Вслед за частицами движется анод и через частицы, связанные с поверхностью катода, проходит второй импульс тока, сопровождающийся механическим ударом ускоренной массы анода. При механическом контакте электродов, наряду с частицами, прогревается тонкий поверхностный слой катода. В этих условиях в зоне взаимодействия развиваются диффузионные процессы переноса микрочастиц и химические реакции между частицами электрода-анода и структурными элементами материала катода с формированием неустойчивой модифицированной структуры (НМС). В таком режиме работы системы «анод - катод» на поверхности катода (образца) вследствие диссипативных процессов формируется тонкий слой покрытия устойчивой модифицированной структуры (УМС).

В рассмотренной термодинамической системе «анод - катод» электрический разряд, физически являющийся концентрированным потоком электронов (плотность мощности $10^7 - 10^{12}$ Вт/см²), взаимодействует с поверхностью металлического образца - катода в исходном состоянии (ЭК). В кристаллической решетке металла вследствие высокоэнергетического взаимодействия резко повышается температура. Длительность активной фазы взаимодействия очень мала и не превышает $10^{-6} - 10^{-5}$ с. Практически одновременно формируются диссипативные тепловые потоки ($\dot{Q}_{\text{ан}}$) в соответствии с теплопроводностью металлического образца-катода и рассеяния

теплоты с модифицированной поверхности. Благодаря этому развивается процесс релаксации и диссипации тепловой энергии искрового разряда.

Высокая плотность мощности искрового разряда и малая продолжительность периода его активного взаимодействия не позволяют сформировать устойчивые диссипативные каналы, что приводит к дисбалансу энергетических потоков. Избыточная доля энергии, превышающая диссипативную долю, расходуется на работу эрозионного поверхностного разрушения главным образом катода (ЭК).

Таким образом, согласно рассмотренному процессу, перенос частиц материала анода происходит в промежутке времени от момента электрического пробоя межэлектродного пространства до момента ударного контакта электродов. Следовательно, вещество на поверхность подложки переносится в жидко-капельном распыленном состоянии.

В рассмотренной модели процесса электроискровой обработки показано, что на всех этапах ЭИО развиваются термодинамические процессы энергомассопереноса. Следовательно, термодинамическая модель процесса электроискровой обработки стали может быть сформирована на основе законов и принципов неравновесной термодинамики открытых систем.

Процесс модифицирования материала катода можно описать термодинамической моделью открытой системы. В соответствии с первым началом термодинамики энергию процесса взаимодействия электродов при электроискровом разряде можно представить в виде следующего выражения для баланса энергии в системе:

$$q_{ИР} \cdot t_{ИР} = q_{АП} \cdot t_{АП} + q_{ДП} \cdot t_{ДП}, \quad (2.4)$$

где $q_{ИР}$ – плотность энергетического потока искрового разряда;

$q_{АП}$, $q_{ДП}$ – плотность энергетического потока активного и диссипативного процессов;

$t_{ИР}$ – время искрового разряда;

$t_{АП}$, $t_{ДП}$ – время активного и диссипативного процессов.

Распределение энергии в процессе формирования устойчивой модифицированной структуры (УМС) можно описать выражением:

$$\Delta U_{УМС} = \Delta U_{НМС} - q_{дп}^* \cdot t_{дп}^*, \quad (2.5)$$

где $\Delta U_{УМС}$ – величина поглощенной внутренней энергии при формировании УМС;

$\Delta U_{НМС}$ – величина поглощенной внутренней энергии при формировании неустойчивой модифицированной структуры (НМС); $q_{дп}^*$, $t_{дп}^*$ – плотность энергетического потока в окружающую среду и время его действия.

Величину поглощенной внутренней энергии при формировании неустойчивой модифицированной структуры можно определить как разность между $q_{ир} \cdot t_{ир}$ и $q_{дп} \cdot t_{дп}$.

Объединив выражения 2.4 и 2.5, получим:

$$\Delta U_{УМС} = q_{ир} \cdot t_{ир} - q_{дп} \cdot t_{дп} - q_{дп}^* \cdot t_{дп}^* \quad (2.6)$$

Плотность потока $q_{дп}$ в 2.6, имеющего «тепловую» природу можно выразить в энтропийном виде, тогда уравнение для описания процесса формирования УМС получим в виде:

$$\Delta U_{УМС} = q_{ир} \cdot t_{ир} - \Delta ST - q_{дп}^* \cdot t_{дп}^* \quad (2.7)$$

В процессе взаимодействия энергетического потока с исходной структурой стального образца (катода) развиваются активационные процессы, при которых исходная структура, поглощая часть энергии ΔU , переходит в более высокое структурно-энергетическое состояние. При этом формируется модифицированная структура, характеризующаяся максимальной для данных условий свободной энергией, которая является неустойчивой (НМС). По мере развития диссипативных процессов снижается уровень свободной энергии, и модифицированная структура переходит в более устойчивое состояние (УМС) с меньшей свободной энергией. В результате материал модифицированного поверхностного слоя переходит в более устойчивое и упорядоченное состояние, в котором достаточно длительное время сохраняются его физико-механические свойства, поскольку система переходит в стационарное термодинамическое состояние.

Развитие активационных и диссипативных энергетических процессов при ЭИО можно представить в виде схемы формирования энергетических потоков с использованием временных зависимостей плотности мощности искрового разряда активационного процесса (рис. 3.3, кривая 1) и теплового диссипативного процесса (кривая 2). Плотность мощности единичного искрового разряда достигает максимального значения к концу периода

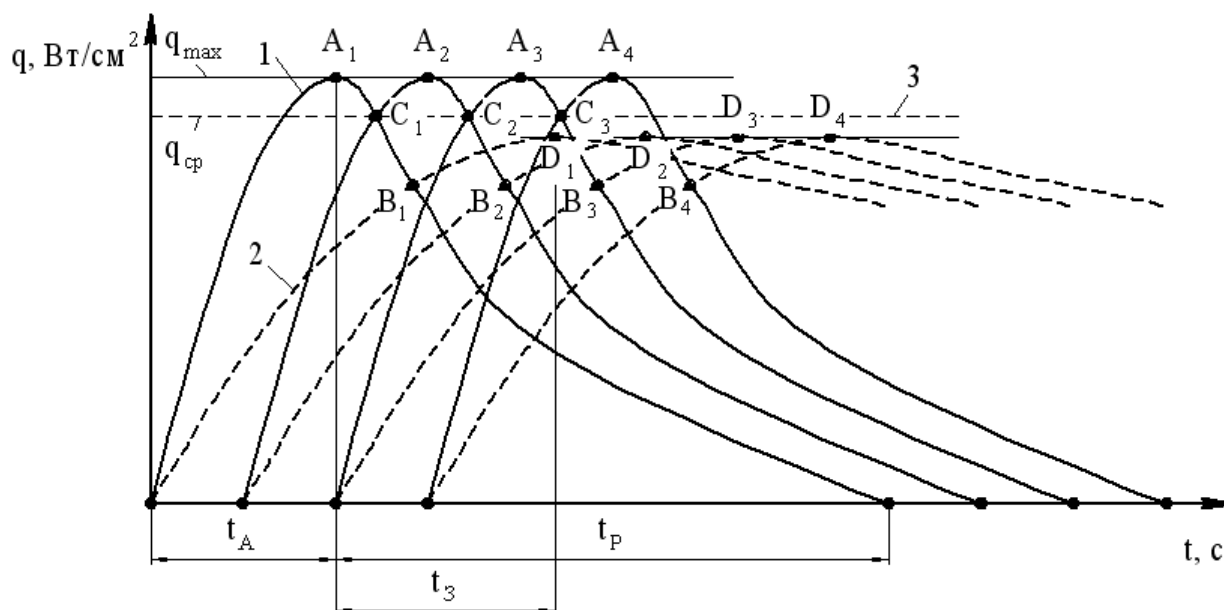


Рисунок 2.3 - Схема формирования энергетических активационных и диссипативных потоков при ЭИО: 1 - зависимость плотности мощности активационного процесса; 2 - зависимость плотности мощности диссипативного (теплового) процесса; 3 - плотность мощности при стационарном процессе

активации в точке A_1 за время t_A . Затем она снижается до нуля за время t_P вследствие рассеяния энергии.

Тепловые процессы развиваются медленнее, поэтому максимальная плотность мощности теплового диссипативного потока достигается в точке D_1 с некоторым запаздыванием на время t_3 по мере формирования температурного поля. Максимальная плотность теплового диссипативного процесса достигается после прохождения максимума мощности, подводимой

электрическим разрядом. В точке B_1 достигается баланс между подводимым потоком электрической энергии и отводимым потоком тепловой энергии.

Рассмотренный процесс характеризует развитие энергетических процессов единичного электрического разряда. В реальном процессе ЭИО импульсы электрических разрядов следуют один за другим с интервалом времени $10^{-6} - 10^{-5}$ с. (Рисунок 2.3), а продолжительность единичного искрового воздействия составляет $10^{-4} - 10^{-2}$ с, но длительность существования активной фазы не превышает $10^{-6} - 10^{-5}$ с. При этом, в точке A_1 удельная мощность начинает уменьшаться.

В точке C_1 удельная мощность электрической энергии вновь начинает повышаться, взаимодействуя с потоком следующего импульса и в точке A_2 достигает максимального уровня. Затем мощность снижается до точки C_2 и далее продолжается циклическое колебание удельной мощности электрического потока. При этом среднее значение мощности остается практически постоянным и равным $q_{cp} = (q_A + q_D)/2$. С запаздыванием на время t_3 формируется устойчивый диссипативный поток тепловой энергии, удельная мощность которого устанавливается на уровне мощности в точках D_1, D_2, D_3 и т.д.

Таким образом, в системе устанавливаются и одновременно устойчиво функционируют два энергетических потока: 1 - активационный поток электрической энергии, 2 - диссипативный поток тепловой энергии. Одновременное функционирование двух названных энергетических потоков приводит систему к стационарному термодинамическому состоянию.

Следовательно, электроискровую обработку поверхностей деталей можно описать через термодинамическую модель стационарного состояния открытой термодинамической системы «легирующий электрод - обрабатываемая деталь» в условиях электроискровой обработки деталей различных конструкций.

Эта модель показывает, что устойчивость процесса формирования модифицированных структур при ЭИО определяется соотношением уровня

энергии активационных и диссипативных процессов при высокочастотных электрических разрядах и изменением энтропии термодинамической системы «легирующий электрод (анод) - обрабатываемая деталь (катод)» в процессе обработки.

Таким образом, разработанная структурная схема термодинамических процессов при ЭИО позволяет показать взаимосвязь физико-химических процессов энергомассопереноса и формирования модифицированных структур в поверхностном слое и покрытиях на обрабатываемой поверхности.

Глава 3. Экспериментальные установки и исследовательское оборудование

3.1. Описание экспериментальной установки дуговой металлизации

Эксперименты проводились на электродуговом металлизаторе ЭДМ-11ШД разработки ГОСНИТИ (г. Москва). Работа диссертанта заключалась в изучении данной конструкции металлизатора, освоении технологии напыления и проведении работ по получению металлизационных покрытий. С учетом того, что дуговая металлизация, прежде всего, используется для антикоррозионной защиты поверхностей изделий и нанесения декоративных покрытий, нежели для упрочнения поверхностей с высокими физико-механическими свойствами, в дальнейшем основной упор в работе был сделан исследованию и применению электроискрового разряда.

3.1.1. Назначение электродугового металлизатора ЭДМ- 11ШД

Электродуговой металлизатор ЭДМ-11ШД представляет собой сверхзвуковой аппарат тянущего типа и предназначен для нанесения покрытий из стали, алюминия, цинка, меди, латуни и бронзы с целью восстановления и различных деталей и частей механизмов, а также покрытий антикоррозионного и декоративного назначения, в условиях как ручного, так и автоматизированного производства.

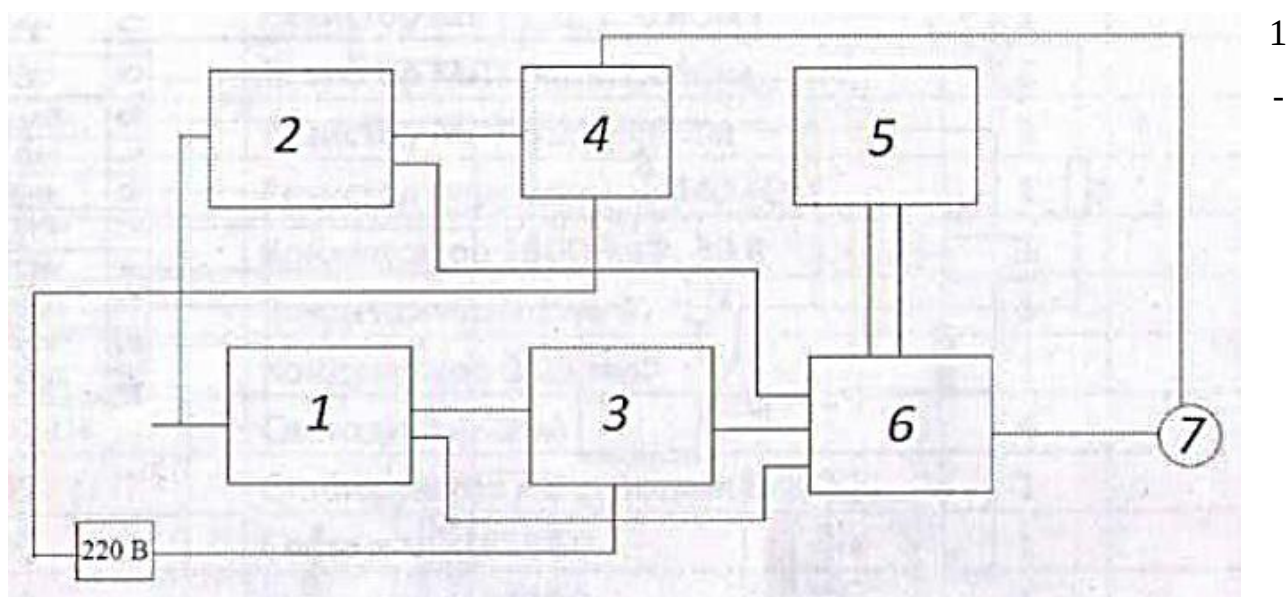
Основные технические характеристики металлизатора:

- мощность дуги – 9,0 кВт;
- ток дуги – до 400,0 А;
- рабочее напряжение дуги – 22,0 – 40,0 В;
- производительность – до 18,0 кг/час;
- толщина покрытия – 0,1 -10,0 мм;
- давление воздуха – 0,6 – 0,7 мПа;
- расход воздуха – 2,0 – 2,5 м³/мин;
- диаметр электродной проволоки – 1,6 – 2,0 мм;
- масса металлизатора – 8,0 кг.

3.1.2. Устройство и принцип работы

Принцип работы аппарата заключается в расплавлении двух проволоочных электродов образующейся между ними электрической дугой и распылением расплавленного металла струей сжатого воздуха. Металлические частицы, попадая на покрываемую поверхность, сцепляются с ней, образуя сплошное покрытие, при этом толщина слоя регулируется производительностью распыления и скоростью перемещения покрываемой поверхности относительно металлатора.

Комплект ЭДМ-11ШД состоит из сверхзвукового металлатора тянущего типа и блока управления, шлангов для электроизоляции проволоки и подачи воздуха, соединительных кабелей. На рисунке 3.1 приведена технологическая блок-схема основного оборудования участка металлизации.



Преобразователь сварочный ВДУ-506. Мощность 12 кВт; 2 – Компрессор воздушный. Производительность 200 м³/час.; 3 – Пульт управления металлатором; 4 – Камера струйно-абразивной обработки; 5 – Двухкатушечная кассета для электродной проволоки; 6 – Сверхзвуковой электрометаллизатор ЭДМ-11ШД; 7 – Вращатель с металлируемой деталью.

Рисунок 3.1 – Технологическая блок-схема основного оборудования участка металлизации

К трехфазной сети питающего напряжения 380 В подключены источник сварочного тока 1 и воздушный компрессор 2. Дистанционное управление источником сварочного тока 1 металлизатором 6 производится с поста управления 3. Электродная проволока на металлизатор поступает с кассеты 5, имеющей две электрически изолированные друг от друга катушки с электродной проволокой. В процессе работы распыленный металл диспергируется воздушным факелом и наносится на поверхность обрабатываемой детали, установленной на вращателе 7.

Металлизатор (Рисунок 3.2) состоит из корпуса 1 и верхней съемной крышки 2, внутри которых находится шаговый двигатель привода, крышки 2

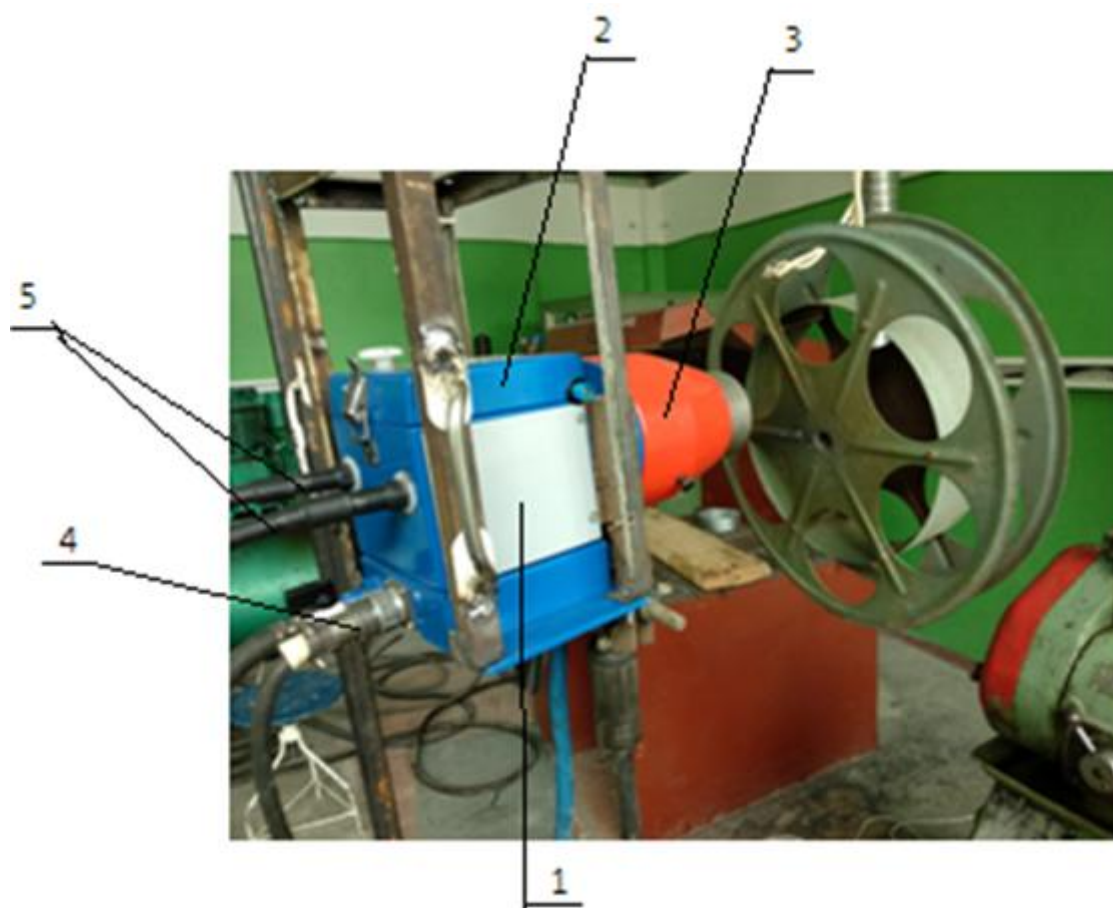


Рисунок 3.2 – Фотография общего вида металлизатора ЭДМ-11ШД

с прижимными роликами (Рисунок 3.3), распылительной головки (Рисунок 3.2), в которую подводится сжатый воздух через задний шланг 3 (Рисунок 3.3) и боковой шланг 4 (Рисунок 3.2). Электродная проволока подается в

распылительную головку 3 ведущими роликами 10 (Рисунок 3.3), которые установлены на концы шагового двигателя.

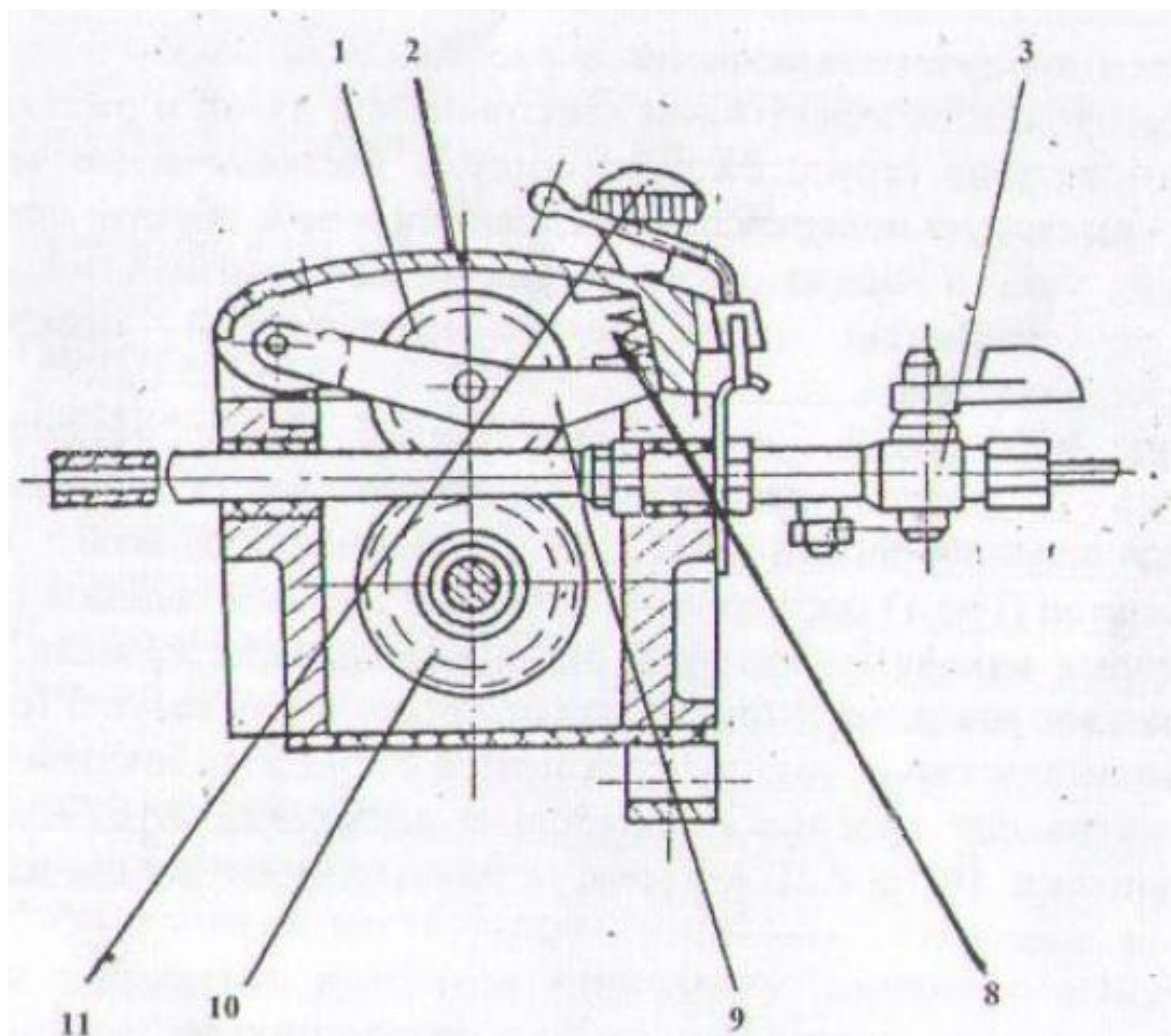


Рисунок 3.3 – чертеж распылительной головки

Электродная проволока сматывается ведущими роликами с катушек через два специальных шланга 5 (Рисунок 3.2), внутри которых вмонтированы направляющие стальные пружины.

В рабочем режиме металлизации прижатие электродной проволоки к ведущим роликам, осуществляется ведомыми роликами 1 под действием пружин 8, опирающимся на рычаг 9. Регулировка прижатия роликов 1 выполняется винтами 11 через пружины 8 (Рисунок 3.4).

В распылительной головке 3 (Рисунок 3.2) располагаются две направляющие трубки для электродных проволок 1 (Рисунок 3.4) с

наконечниками 3, а также сверхзвуковое сопло 2, трубка сжатого воздуха 4 и токопроводы 5.

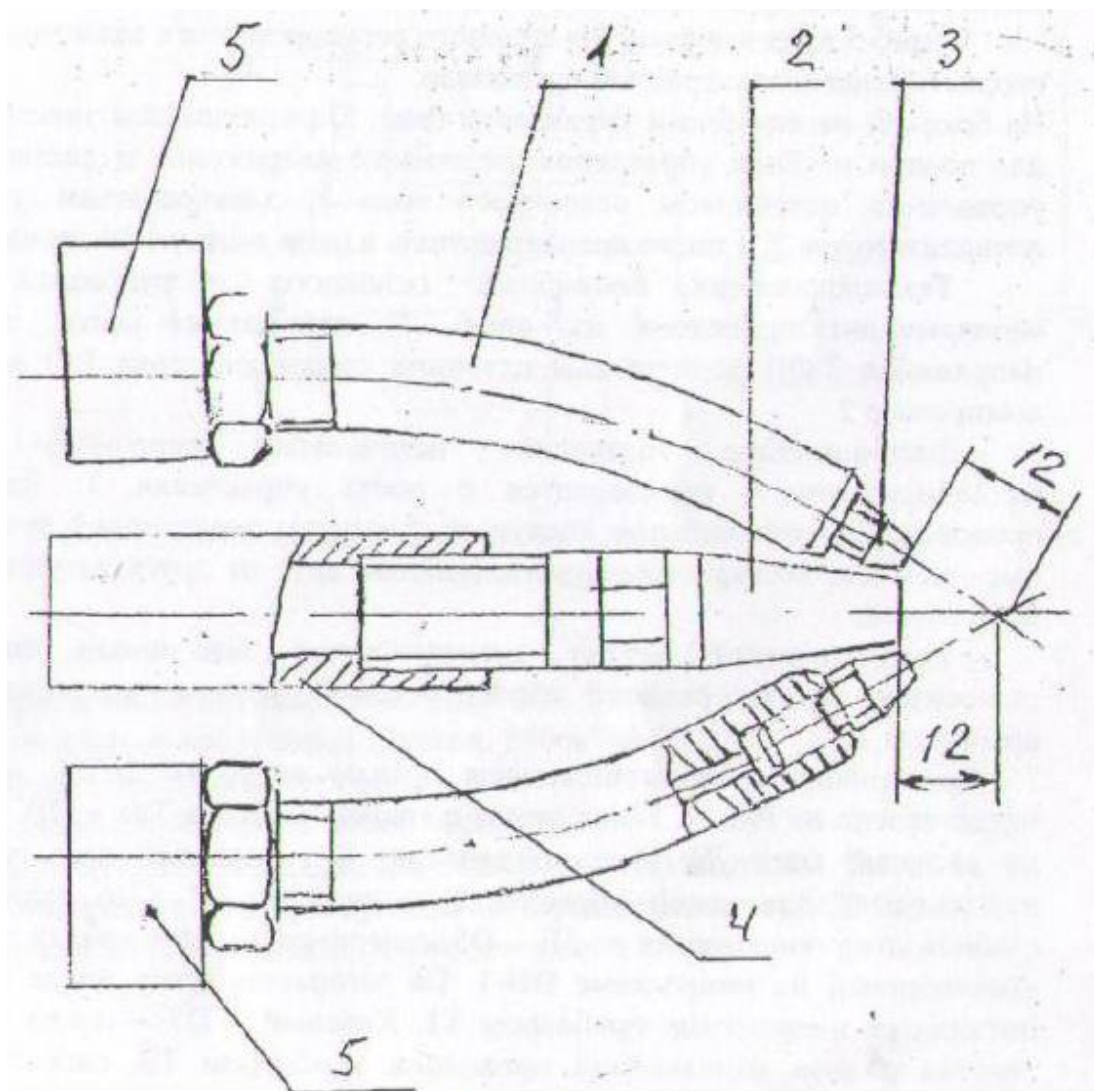


Рисунок 3.4 – Чертеж распылительной головки

На рисунке 3.5 приведена фотография пульта управления металлизатором. Он предназначен для возможности подготовки режима металлизации и управления процессом напыления. На передней панели пульта расположены элементы управления: тумблер подачи питания, тумблер прямого и обратного движения электродных проволок, ручка регулировки скорости движения электродных проволок и кнопка запуска металлизатора.



Рисунок 3.5 – Фотография пульта управления металлизатором

3.1.3. Технология напыления покрытий

Технология электродуговой металлизации складывается из струйно-абразивной подготовки поверхности, нанесения покрытий и, в случае необходимости, последующей механической обработки. Подготовка поверхности имеет целью удалить с нее имеющиеся загрязнения и окисную пленку, а также придать ей возможно большую шероховатость для прочного сцепления наносимого покрытия.

Обычным средством подготовки поверхности со сложной конфигурацией является обдувка металлической колотой дробью с помощью аппарата для струйно-абразивной операции. Обдувка производится при давлении сжатого воздуха 0,4 – 0,6 мПа, очищенного от влаги и масел. Для тел вращения в

отдельных случаях применяется подготовка поверхности нарезанием «рваной» резьбы. Значение параметров шероховатости поверхности изделия, требования к материалам для электродуговой металлизации, к покрытию и методам контроля должны соответствовать ГОСТ 9.304-84.

Режим работы аппарата устанавливается оператором в зависимости от источника электрического питания, применяемого металла, диаметра электродной проволоки, давления сжатого воздуха и размеров изделия. С увеличением давления сжатого воздуха на входе в аппарат возрастает и плотность покрытия, повышаются его физико-механические свойства.

Напряжение на дуге устанавливается в пределах, обеспечивающих стабильность горения дуги и предотвращение перегрева покрытия. Выбор производительности металлизации определяется технологической целесообразностью. В процессе металлизации не допускать нагрева обрабатываемой поверхности выше 120 °С. Расстояние от точки плавления проволоки до металлизированной поверхности следует выдерживать в пределах 100 – 120 мм. Толщина слоя при металлизации плоских поверхностей не должна превышать 4 мм. Для тел вращения при восстановлении изношенных поверхностей или при нанесении антифрикционных покрытий толщина слоя может достигать более 4 мм.

3.2. Описание экспериментальной установки электроискровой обработки

Эксперименты проводились на комбинированной установке электроискрового и вибродугового упрочнения поверхностей металлических изделий ЦМТ-3 разработки ООО «Центр модернизации техники», г. Чистополь, Республика Татарстан, Россия.

3.2.1. Принцип действия установки

Электроискровое или вибродуговое упрочнение осуществляют вибрирующим электродом вручную. Перед началом работы вибратор и аппарат регулируют в соответствии с принятыми режимами обработки. После

включения аппарата электроды вводят в соприкосновение друг с другом и затем перемещают упрочняющий электрод относительно упрочняемой поверхности, поддерживая постоянным давление на вибратор. Принцип работы установки ЦМТ-3 основан на периодических разрядах при касании электродом поверхности обрабатываемой детали. При касании электродом детали возникает электрический разряд. Если работает электроискровая часть установки, то разряд будет электроискровым, если подключена вибродуговая часть, то разряд будет дуговым. Воздействие электрического разряда ограничено малой поверхностью электрода, вследствие чего возникает импульсный ток большой плотности при высокой концентрации теплоты, что приводит к интенсивному нагреву, переносу металла с анода на катод и оплавлению его на поверхности детали. Поверхностный слой образуется в результате многократного воздействия на деталь электрических импульсов и представляет собой ряд хаотически расположенных бугорков от застывших частиц материала электрода.

Интенсивность формирования поверхностного слоя вплотную зависит от величины энергии разряда и среднего тока источника импульсов. Изменение данных параметров непосредственно влияет на толщину слоя, его микротвердость, пористость, сплошность, шероховатость, толщину переходного слоя.

3.2.2. Электрическая схема установки

Принципиальная электрическая схема комбинированной установки электроискрового и вибродугового упрочнения поверхностей металлических изделий ЦМТ-3 представлена на рисунке 3.6. Основными составляющими электрической схемы являются 3 блока: генераторный Г, источник питания

	Название	Кол-во шт.
БП	Инвертор сварочный ($U_{\text{вых}} = 60 \text{ В}$, $I_{\text{max}} = 250 \text{ А}$)	
Тр	Трансформатор (подбирается в зависимости от вибратора)	
В	Вибратор	1
V	Вольтметр, 80-100 В	1
VS1	Тиристор Т142-80-10 (на радиаторе)	1
VS2	Тиристор Т122-20-10 (В ПУ)	1
ПУ	Пусковое устройство	1
ПГ	Переключатель галетный	2
C1	Конденсатор МБГО 30 мкф 160 В	1
C2=C3	Конденсаторы К50-27 4 7 мкф 450 В	2
C4	Конденсаторы К50-71 220 мкф 400 В	1
C5-C7	Конденсатор 10000/100 В	3
R1	Резистор 560 Ом 2 Вт	1
R2	Резистор (подбирается в зависимости от вибратора)	1
Э	Электрод (ВК, ТК, ТТК и др.)	1
Д	Деталь	1
Б	Вентилятор (на схеме не показан)	1

Рисунок 3.7 – Спецификация электрической схемы установки ЦМТ-3

Блок питания БП представляет собой обычный инверторный сварочный аппарат с питанием от сети 220 В, 50 Гц. Для более стабильной работы установки ЦМТ-3 выбран сварочный аппарат постоянного тока с напряжением холостого хода 60 В и регулируемой величиной тока от 0 до 250 А.

Вибратор В электромагнитный с поступательным движением электрода. Он питается от переменного напряжения 220 В, 50 Гц через понижающий трансформатор ТР. Оптимальная величина подаваемого напряжения на вибратор $U_{\text{опт}} \approx 30 \text{ В}$. Частота возникающих в вибраторе колебаний переменного напряжения, и, соответственно, частота колебаний и искрообразования между электродом и изделием соответствует частоте 100 Гц. Амплитуда колебаний электрода вибратора регулируется сопротивлением R2. Диапазон колебаний электрода от 0,5 до 1,0 мм.

3.3. Методы исследования и исследовательское оборудование

3.3.1. Методы осциллографических исследований

Методы осциллографических исследований широко применяются для визуального наблюдения и измерения параметров непрерывных периодических и импульсных сигналов, а также непериодических и одиночных сигналов. Осциллограф – это универсальный измерительный прибор, применяемый для наблюдения и фотографирования формы кривой напряжения и тока, исследования импульсных (быстро протекающих) процессов, изменения частоты, фазовых соотношений, временных интервалов и других электрических величин и параметров. Важным устройством в осциллографе является генератор линейной развертки. Это генераторы релаксационных колебаний, создаваемых цепями с активным сопротивлением и реактивным элементом. В таких генераторах имеется возможность изменять частоту в широких пределах. Синхронизация частот обеспечивается изменением частоты генератора развертки так, что при определенном соотношении частот развертки и сигнала получают неподвижное изображение. В нашем случае задача состояла в изучении вольт-амперной характеристики (ВАХ) электроискрового разряда. Для решения этой задачи был использован цифровой осциллограф Rigol DS2072A. На рисунке 3.8 приведена фотография общего вида осциллографа DS2072A.

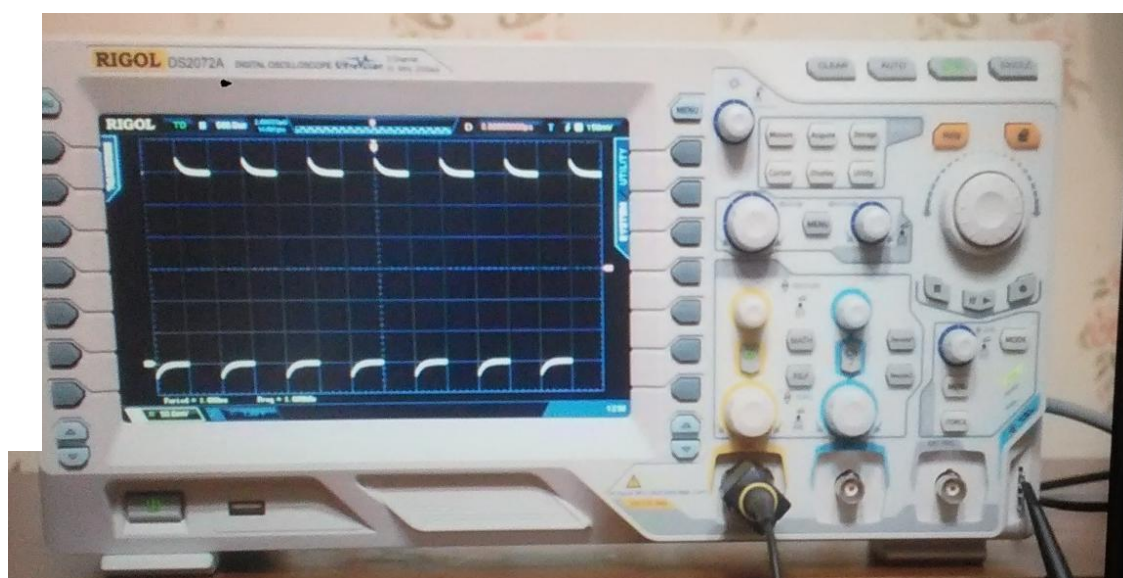


Рисунок 3.8 – Фотография общего вида осциллографа DS2072A

Осциллограф DS2072A относится к серии цифровых осциллографов DS2000A Rigol. RIGOL является зарегистрированной торговой маркой «Научно-технической компании «Пуюань Цзиндянь», г. Пекин.

Осциллограф DS2000A представляет собой серию цифровых осциллографов с низкой полосой пропускания высокого качества, изготовленных на основе технологии Ultra Vision. Данный осциллографы обладают большой глубиной памяти, ультра широким динамическим диапазоном, превосходным коэффициентом захвата сигнала и всевозможными функциями запуска. Вместе с этим, устройства обладают функцией записи сигнала с помощью аппаратного оборудования.

Перед использованием осциллографа DS2000A было произведено изучение описания подготовительных работ перед использованием прибора и начальные рекомендации. Ознакомился с функцией вертикального и горизонтального отклонения осциллографа, со способами запуска осциллографа, с типами связей запуска, с блокировкой запуска, с внешним запуском и с видами запуска, с тем, как использовать опорный сигнал для сравнения с входным сигналом. После этого была составлена схема подключения осциллографа к установке ЦМТ-3 для снятия ВАХ электроискрового разряда.

3.3.2. Фотографические исследования топографии обработанной поверхности электроискровым разрядом

На сегодня наиболее распространенными оптическими методами изучения топографии поверхностей являются методы сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) и растровой (сканирующей) электронной микроскопии

(РЭМ). Существуют также и другие формы сканирующей зондовой микроскопии: сканирующая туннельная микроскопия (STM), атомно-силовая микроскопия (AFM), магнитосиловая зондовая микроскопия (MFM), сканирующая микроскопия ближней оптической зоны (SNOM). Электронная микроскопия включает в себя три технологических разновидности: сканирующая электронная микроскопия (СЭМ, SEM), трансмиссионная электронная микроскопия (ТЭМ, TEM) и сканирующая трансмиссионная электронная микроскопия (СТЭМ, STEM). Термин С/ТЭМ объединяет два вида трансмиссионной электронной микроскопии – ТЭМ и СТЭ [40 – 42].

Сканирующая зондовая микроскопия объединяет достаточно большой класс методов исследования поверхности и отдельных нанообъектов с помощью сканирующего механического острия (зонда). Данная группа методов является наиболее широко используемой в области наноматериалов и нанотехнологий. Основная идея всех методов данной группы заключается в использовании зонда – устройства считывания информации с поверхности исследуемого материала. В большинстве случаев в качестве рабочего тела зонда используется алмазная игла с радиусом при вершине порядка 10 нм. С помощью высокоточного позиционирующего (сканирующего) механизма зонд перемещают над поверхностью образца по трем координатам. Как правило, имеется два диапазона перемещения зонда: грубое перемещение с относительно низкой точностью и высокой скоростью и точное перемещение с достаточно низкой скоростью и высокой точностью позиционирования до 0,1-1 нм. Большая точность позиционирования обеспечивается, как правило, по высоте. Сигнал от зонда обрабатывается с помощью компьютера и преобразуется в трехмерное изображение. Для обработки снимаемых сигналов, их фильтрации и корректировки используются специальные пакеты программ. Стоимость и размеры зондовых микроскопов, как правило, значительно ниже, чем у электронных, а возможности вполне соизмеримы. Для ряда вариантов зондовой микроскопии наличие вакуума не требуется,

материалы исследования могут быть самые разнообразные, в том числе изоляторы, полупроводники, биологические объекты.

На растровом электронном микроскопе (РЭМ) можно исследовать общий характер структуры всей поверхности объекта при малых увеличениях и детально изучить любой интересующий исследователя участок при больших увеличениях. Растровый (сканирующий) электронный микроскоп позволяет получать изображения поверхности образца с разрешением несколько нанометров. Ряд дополнительных методов позволяет получать информацию о химическом составе приповерхностных слоев.

Принцип действия электронных микроскопов основан на взаимодействии потока ускоренных заряженных частиц – электронов с веществом. Прибор может работать как в просвечивающем, так и в отражающем режиме. В электронном микроскопе образование контраста изображения обусловлено рассеянием электронов в результате сложного взаимодействия с атомами вещества, что не позволяет трактовать получаемое изображение как прямой снимок объекта. Прибор оснащен вакуумной системой. Также в каждом РЭМ есть предметный столик, позволяющий перемещать образец минимум в трех направлениях. При взаимодействии зонда с объектом возникают несколько видов излучений, каждое из которых может быть преобразовано в электрический сигнал. В зависимости от механизма регистрирования сигнала различают несколько режимов работы

сканирующего электронного микроскопа: режим вторичных электронов, режим отражённых электронов, режим катодолюминесценции и др.

В связи с отсутствием исследовательского оборудования по рассмотренным оптическим методам изучения топографии поверхностей, мною был использован микроскоп Levenhuk 40l/50l/d50l, имеющийся в распоряжении научного руководителя (Рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Общий вид микроскопа levenhuk 40l/50l/d50l

Levenhuk D50L NG – качественный цифровой микроскоп с тубусом длиной 100 мм. Его отличительной особенностью является способность фотографировать и снимать на видео в высоком качестве наблюдения. С помощью USB-интерфейса микроскоп подключается к компьютеру. Снизу и сверху от предметного столика расположены элементы подсветки, которые позволяют исследовать и прозрачные, и непрозрачные твердые предметы. Изображение предмета, полученное через объектив, можно выводить прямо на монитор компьютера, а также можно проводить исследования через окуляр, если перейти в визуальный режим с использованием прилагаемых окуляров: WF10x и WF16x.

В комплект входит USB-кабель для соединения с ПК и питания камеры. Камера совместима с Windows XP/Vista/7/8/10 (32 и 64 бит). Данная модель интересна своей модернизированной подсветкой: верхний осветитель можно при желании снимать, а нижний обладает опцией регулировки яркости.

Комплектация микроскопа:

- Микроскоп;
- Объективы: 4x, 10x и 40x;
- Окуляры: WF10x и WF16x;
- Линза Барлоу: 2x;
- Цифровая камера Levenhuk D50L (2 Мпикс);
- ПО для Windows (программа Levenhuk ToupView);

- USB-кабель;
- Предметный столик с зажимами;
- Диск с диафрагмами;
- Встроенный нижний осветитель на светодиодах;
- Съёмный верхний галогенный осветитель;
- Сетевой адаптер (питание 220 В / 5 В, 50 Гц);
- Батарейки для питания подсветок;
- Микротом – инструмент для получения исследуемых под микроскопом тонких срезов с образцов и препаратов, позволяет получать срезы толщиной в доли миллиметра;
- Флакон с дрожжами;
- Флакон со смолой для изготовления препаратов.

3.3.3. Электрофизические методы исследования структуры поверхностного слоя обработанного изделия электроискровым разрядом

Для исследования структуры поверхностного слоя обработанного изделия в основном используются те же электрофизические методы, применяемые для изучения топографии поверхностей [43, 44]. Для проведения детальных исследований структуры поверхностного слоя изделия производят его поперечный срез, полученный образец впрессовывают в смолу и полученный препарат полируют на вращающемся шлифовальном круге с использованием пасты из тонкого алмазного порошка или глинозема. Отполированная таким образом поверхность препарата изучается затем с применением методов сканирующей зондовой микроскопии и растровой (сканирующей) электронной микроскопии или под микроскопом, оборудованным специальным устройством. В данном случае исследования производили с использованием микроскопа Levenhuk 40l/50l/d50l, описанного в предыдущем параграфе магистерской диссертации, и комплекса оборудования федерального научного агроинженерного центра ВИМ (г. Москва), состоящего из микротвердомера КМТ-1, ручного отрезного станка «Labotom-3 Struerus», автоматического

электрогидравлического прессы «CitoPress-1 Struerus» и шлифовально-полировального станка «LaboPol-5 Struerus».

Приведем краткие характеристики указанного оборудования. На рисунке 3.10 представлена фотография микротвердомера КМТ-1. Он предназначен для



Рисунок 3.10 – Фотография микротвердомера КМТ-1

измерения микротвердости различных металлов и сплавов выдавливанием алмазных наконечников. Автоматизированно обрабатывает результаты контроля и выводит их на ПК. Особенностью прибора является возможность измерения микротвердости покрытия с нерегулярной шероховатостью. Диапазон нагрузок от 0,049 до 1,96 Н (от 0,005 до 0,2 кгс). Задание нагрузки ручное. Измерение отпечатков производится с помощью видеоустройства, подключенному к персональному компьютеру. Для этого имеется специализированное программное обеспечение со статической обработкой и возможностью автоматического анализа изображения в соответствии со стандартами измерения твердости. Кратность увеличения видеоустройства позволяет проводить микроструктурный анализ металлов на поверхности шлифов после их протравливания специальными растворами.

На рисунке 3.11 приведена фотография ручного отрезного станка «Labotom-3 Struerus». Он предназначен для предварительной резки образцов

самых различных материалов с поперечными размерами до 100x100 мм, в т.ч. длинномерных заготовок сменными отрезными дисками. Работает в режиме



Рисунок 3.11 – Фотография ручного отрезного станка «Labotom-3 Struerus»

ручного управления давлением на отрезаемую заготовку со смывом стружки. Скорость вращения сменных отрезных дисков постоянная. Резание производится с подачей на диск охлаждающей жидкости, циркулирующей в замкнутой системе станка.

На рисунке 3.12 приведена фотография автоматического электрогидравлического пресса «CitoPress-1 Struerus». Он предназначен для изготовления заготовок шлифов из различных материалов для микроструктурного анализа. Имеется перестраиваемое программное управление для задания усилия прессования, темпа и продолжительности

нагрева смолы, а также режима водяного охлаждения полученного образца. Прессование во время нагрева смолы, засыпаемой на отрезанные образцы, осуществляется гидравлической системой. В спрессованном диске диаметром 30 мм можно разместить до 10 пластинок длиной 20 – 25 мм, толщиной 2 – 3 мм и высотой 10 – 15 мм.



Рисунок 3.12 – Фотография автоматического электрогидравлического пресси
«CitoPress-1 Struerus»

На рисунке 3.13 приведена фотография шлифовально-полировального станка «LaboPol-5 Struerus». Его назначение: шлифование и полирование исследовательских образцов для приготовления шлифов. Частота вращения шпинделя станка от 50 до 500 об/мин. одновременное полирование до трех образцов. Имеется набор дисков и суспензий для поэтапной шлифовки и

полировки образцов разной твердости до высокой степени класса шероховатости поверхности.



Рисунок 3.13 – Фотография шлифовально-полировального станка «LaboPol-5 Struerus»

Глава 4. Экспериментальные исследования влияния электроискрового разряда на физико-механические свойства поверхностного слоя изделия

4.1. Вольт-амперная характеристика электроискрового разряда

Осциллограммы тока и напряжения являются важнейшими характеристиками для контроля параметров установки. По ним, в частности, можно определить вкладываемую энергию в разряд. Эту энергию можно рассчитать путем графического интегрирования. В то же время, с учетом, что накопителем энергии генератора служат емкости, расчет энергии разряда можно производить по формуле:

$$W_c = \frac{C \times U^2}{2} \quad (1)$$

где C – емкость накопительного конденсатора. U – напряжение на накопительном конденсаторе.

На рисунке 4.1 приведена фотография установки ЦМТ-3 совместно с осциллографом Rigol DS2072A, на рисунке 4.2 – схема подключения установки ЦМТ-3 к осциллографу для снятия ВАХ электроискрового разряда.



Рисунок 4.1 –
Фотография установки
ЦМТ-3 совместно с
осциллографом Rigol
DS2072A

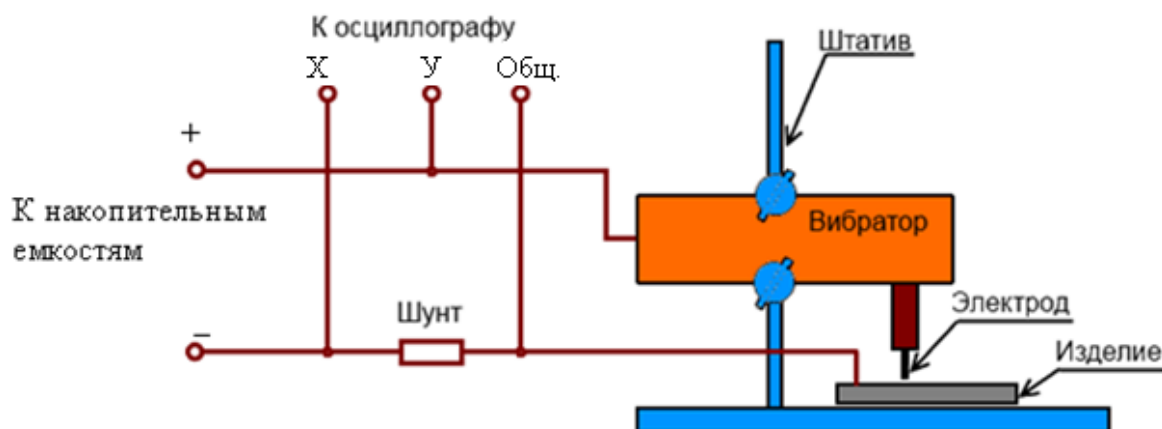


Рисунок 4.2 – Схема подключения установки ЦМТ-3 к осциллографу для снятия ВАХ электроискрового разряда

Включение шунта с небольшим сопротивлением в схему подключения установки ЦМТ-3 к осциллографу для снятия ВАХ электроискрового разряда связано с тем, что входы осциллографа Rigol DS2072A предусмотрены на ввод только потенциалов напряжения. Несмотря на то, что осциллограф Rigol DS2072A является современным прибором, снятие ВАХ на нем оказалось затруднительным. Дело в том, что электроискровой разряд имеет множество высокочастотных составляющих тока. Нам не удалось их отфильтровать. Поэтому был использован наиболее простой осциллограф С1-107, который не реагировал на высокочастотные составляющие тока. На рисунке 4.3 представлена фотография ВАХ электроискрового разряда с экрана осциллографа. Вначале нам представлялось, что ВАХ электроискрового разряда должна была быть резко падающей. Однако она оказалась восходящей и далее резко падающей. Анализ показал, что здесь нами не учтен третий параметр в этом процессе. Это – изменение межэлектродного расстояния во времени. Думается, что учет этого параметра будет необходим при дальнейших исследованиях характеристик электроискрового разряда.

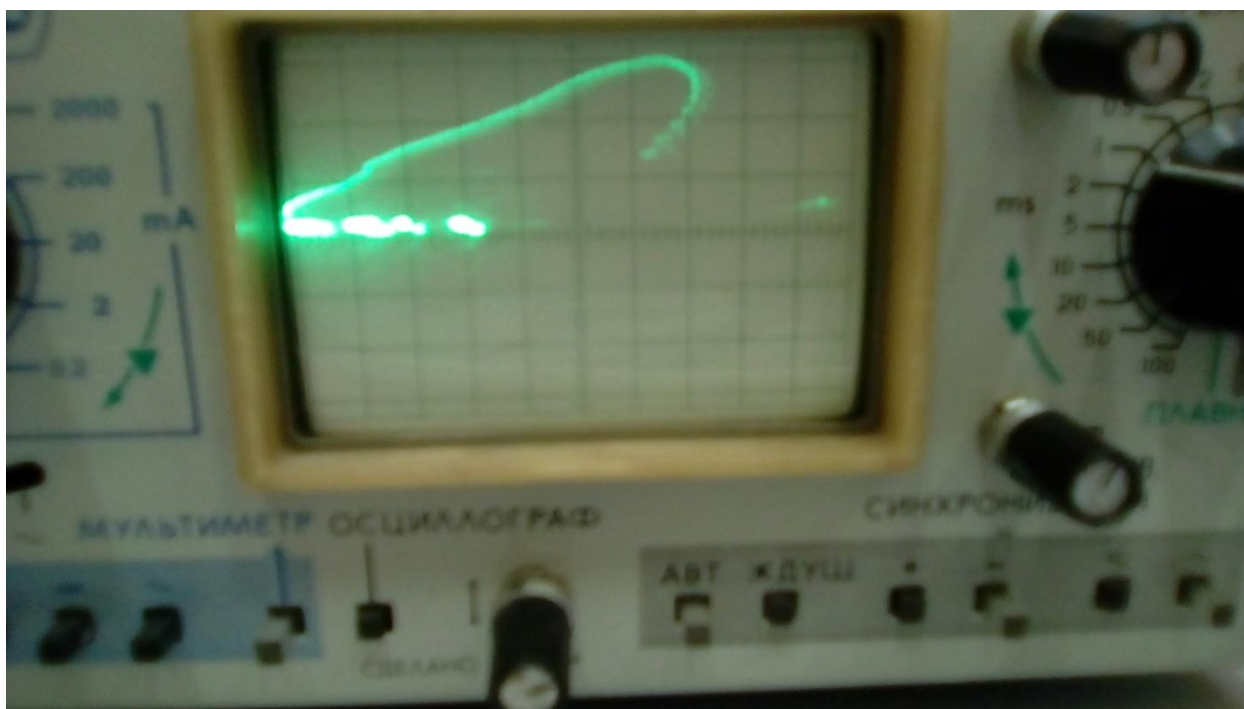
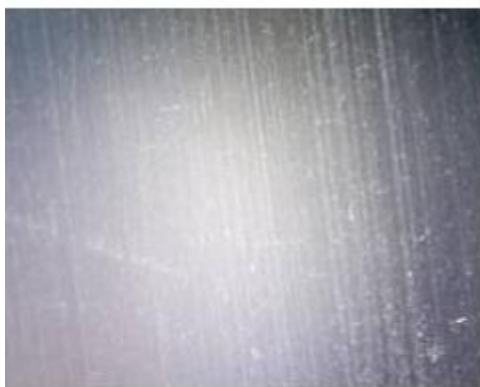


Рисунок 4.3 – Фотография ВАХ электроискрового разряда с экрана осциллографа С1-107

4.2. Топография обработанной поверхности электроискровым разрядом

Из обзора состояния электроискрового метода упрочнения поверхностей следует, что электроискровой разряд резко ухудшает класс шероховатости поверхности, но при этом качественные характеристики поверхности детали, как твердость, износостойкость, коэффициент трения и др. существенно улучшаются. Изучение вопроса показало, что и в данном случае можно обойтись без заметного ухудшения класса шероховатости поверхности за счет ее шлифования и полировки с применением алмазных кругов и паст. Особенно это требуется при упрочнении поверхностей различных штампов. На рисунке 4.4 приведены фотографии поверхности стали Ст. 45 до и после обработки электроискровым разрядом. Из них видно, что после упрочнения резко ухудшается шероховатость исходной поверхности. Однако, надо полагать, что такое ухудшение поверхности не отразится, например, на режущей способности таких рабочих органов сельскохозяйственной техники, как зубчатый сегмент ножа косилки, диск сошника или лапа культиватора.



а



б

Рисунок 4.4 – Фотографии поверхности стали Ст. 45 до (а) и после (б) электроискрового упрочнения. Фотографирование с микроскопа Levenhuk 40l/50l/d50l через цифровую камеру Levenhuk D50L с выводом на персональный компьютер. Увеличение 100 крат. Размер исследуемой площади (фотографии) 1,6х1,2 мм

4.3. Структура и состояние поверхностного слоя образца после обработки электроискровым разрядом

Как было сказано в параграфе 2.2.3 главы 2 магистерской диссертации для исследования структуры поверхностного слоя обработанного изделия электроискровым разрядом будут использованы микроскоп Levenhuk 40l/50l/d50l и микротвердомер КМТ-1. Напомним, что для исследований поверхностного слоя предварительно были изготовлены шлифы образцов с применением специального оборудования.

На рисунке 4.5 представлена фотография упрочненного слоя стали Ст. 3 электроискровым методом. Фотографирование с микроскопа Levenhuk 40l/50l/d50l через цифровую камеру Levenhuk D50L с выводом на персональный компьютер. Увеличение 100 крат. Размер исследуемой площади (фотографии) 1,6х1,2 мм. На фотографии четко видно, что есть измененный слой поверхности образца на глубину порядка 0,3 мм. По

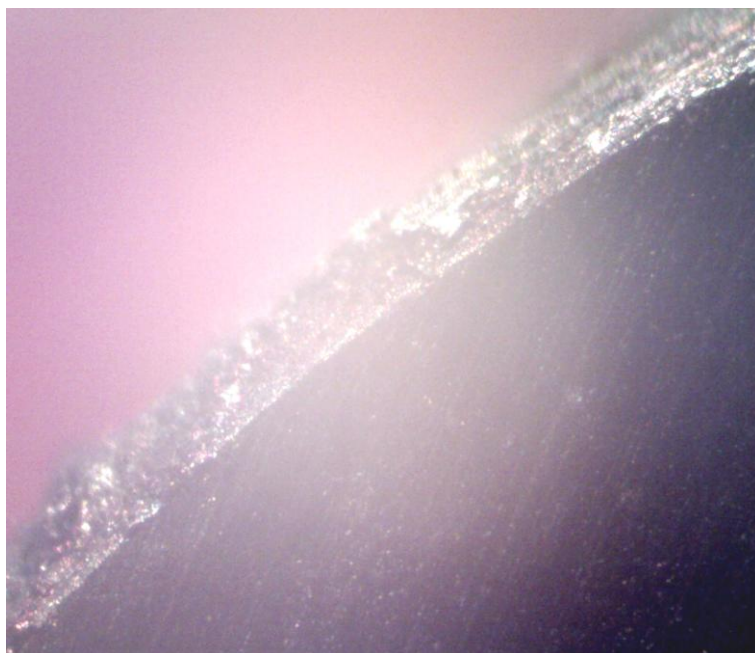


Рисунок 4.5 – Фотография поверхности шлифа стали Ст. 3 после электроискрового упрочнения. Фотографирование с микроскопа Levenhuk 40l/50l/d50l через цифровую камеру Levenhuk D50L с выводом на персональный компьютер. Увеличение 100 крат. Размер исследуемой площади (фотографии) 1,6x1,2 мм

аналогичным исследованиям моего научного руководителя упрочненный слой увеличивается ~ на 20 мкм, а его твердость становится порядка 70 HRC.

Для более глубокого исследования поверхностного слоя образца после обработки электроискровым разрядом с определением изменения микротвердости по глубине материала был использован измерительный комплекс КМТ-1. Исследования производились на образцах из стали Ст. 45 толщиной 4 мм. Измерение микротвердости проводили по методу Виккерса. Нагрузка $F = 1$ Н, время выдержки $t = 10$ сек. Увеличение 370. Исследованию подверглись 3 образца. Образец №1 – исходный материал, образец №2 – образец с электроискровым упрочнением, образец №3 – образец с электроискровым упрочнением с нанесенной на поверхность специальной

пастой. Состав пасты: порошок ПГ-10Н-01 - 55%, карбид бора - 20 %, бура - 10%, криолит - 8%, SiO₂ - 5%. Al - 2%. Связывающее вещество - 20% раствор жидкого стекла.

Приведем результаты исследований. На рисунке 4.6 представлена фотография шлифа (поперечного среза) исходного материала (образец № 1). На поверхности шлифа видно, что по структуре исходный материал однороден. Для исследования микротвердости было проставлено 16 отпечатков. Значения микротвердости образца № 1 приведены в таблице 4.1.

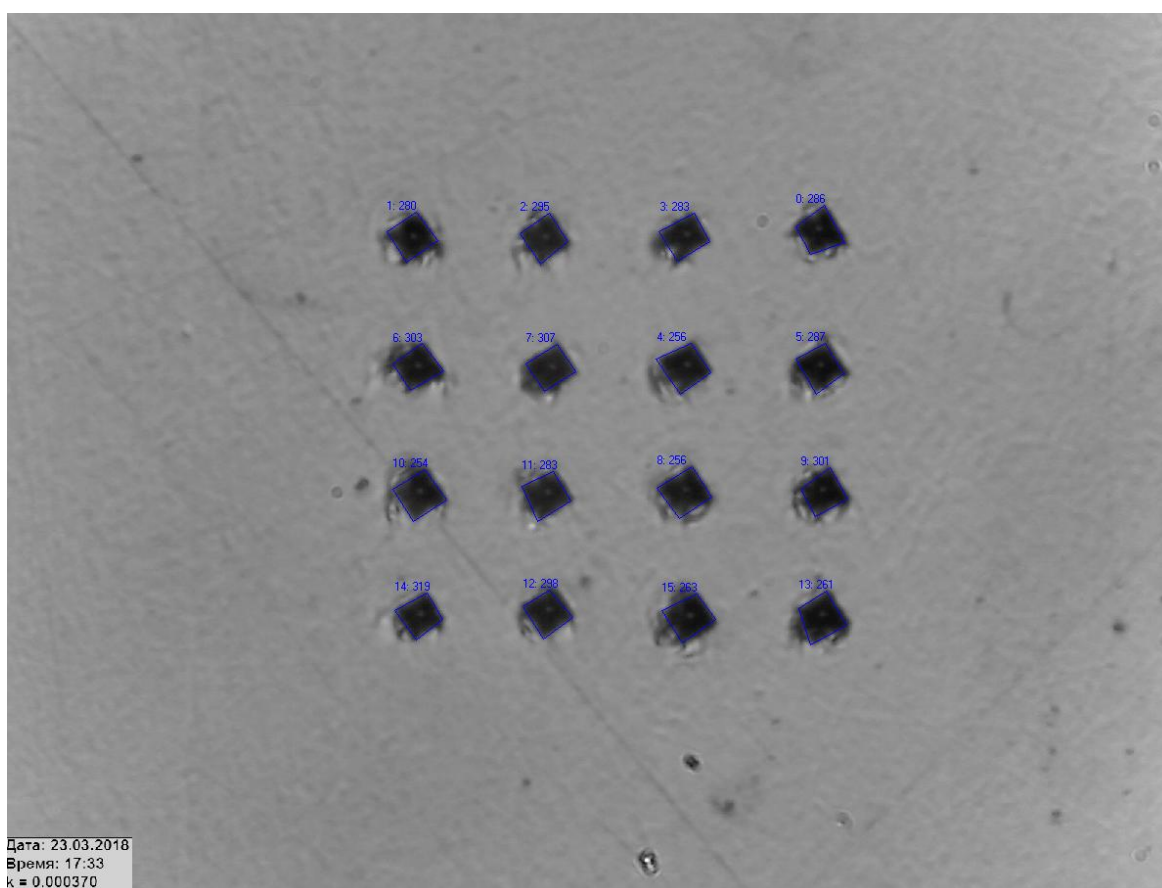


Рисунок 3.6 – Образец № 1. Фотография шлифа (поперечного среза) исходного материала. Увеличение 370. Измерение микротвердости по методу Виккерса.

Измерительный комплекс КМТ-1

Таблица 4.1 – Значения микротвердости образца № 1

Исследуемая область	Значение микротвердости, кгс/мм ²				Среднее значение микротвердости, кгс/мм ²
Зона основного материала	280	295	283	286	286
	303	307	256	287	288
	254	283	256	301	274
	319	298	263	261	285
Среднее значение микротвердости материала основы, кгс/мм ²					283

Вывод: среднее значение микротвердости материала основы составило 283 кгс/мм².

На рисунке 4.7 представлена фотография шлифа (поперечного среза) образца № 2 с электроискровым упрочнением. На поверхности шлифа видно, что по структуре наплавленный слой однороден, однако в нем наблюдаются многочисленные поры с неровными краями. Граница перехода нечеткая. Микротвердость исследовалась на наплавленном слое, а так же на материале основы. Было проставлено 28 отпечатков: на наплавленном слое 8 отпечатков, на материале основы 20 отпечатков. Значения микротвердости образца № 2, полученные в области границы двух зон, приведены в таблице 4.2.

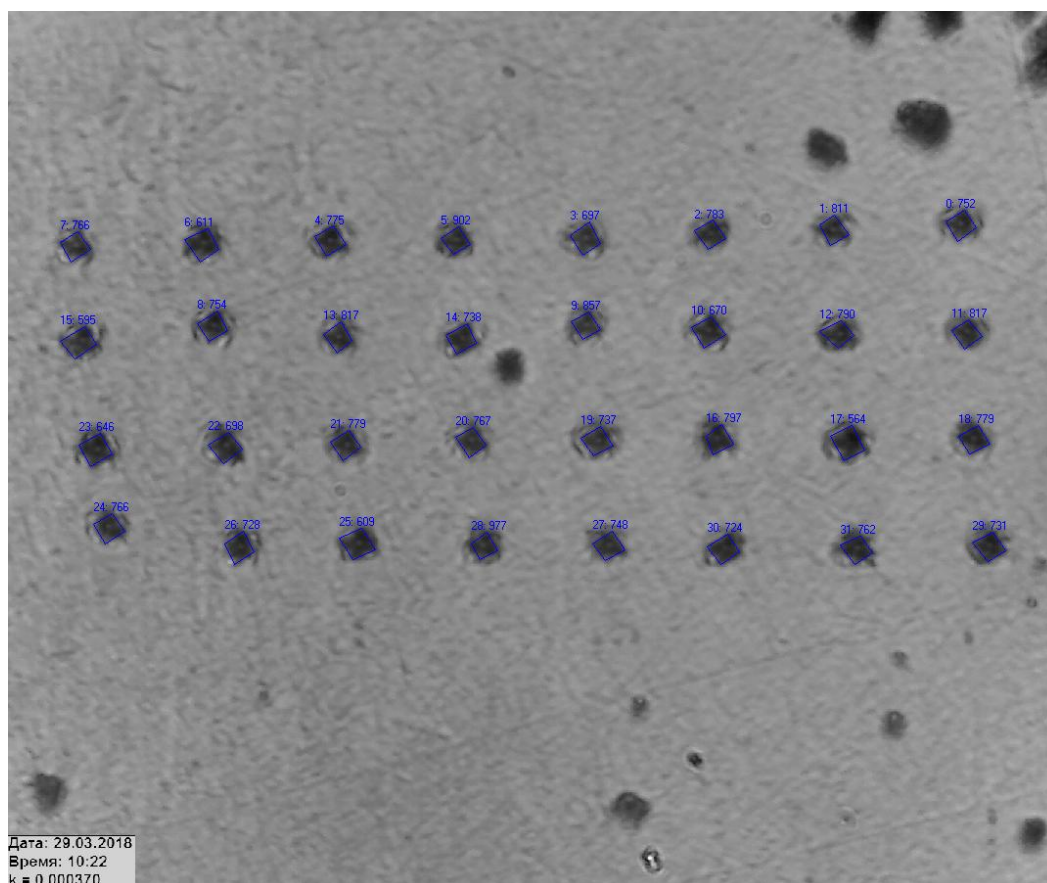


Рисунок 4.7 – Образец № 2. Фотография шлифа (поперечного среза) образца с электроискровым упрочнением. Увеличение 370. Измерение микротвердости по методу Виккерса. Измерительный комплекс КМТ-1

Таблица 4.2 – Значения микротвердости образца № 2

Исследуемая область	Значение микротвердости, кгс/мм ²				Среднее значение микротвердости, кгс/мм ²
Зона основного материала	336	351	343	336	342
	370	361	398	374	376
	452	370	433	386	410
	400	454	411	499	441
	569	547	608	574	575
Среднее значение микротвердости материала основы,					429

кгс/мм ²					
Зона	821	895	873	829	855
покрытия	808	839	1048	887	896
Среднее значение микротвердости материала покрытия, кгс/мм ²					876

Вывод: среднее значение микротвердости материала основы составило 429 кгс/мм². Среднее значение микротвердости материала покрытия составило 876 кгс/мм².

На рисунке 4.8 представлена фотография шлифа (поперечного среза) образца № 3 с электроискровым упрочнением с нанесенной на поверхность специальной пастой. На поверхности шлифа видно, что по структуре

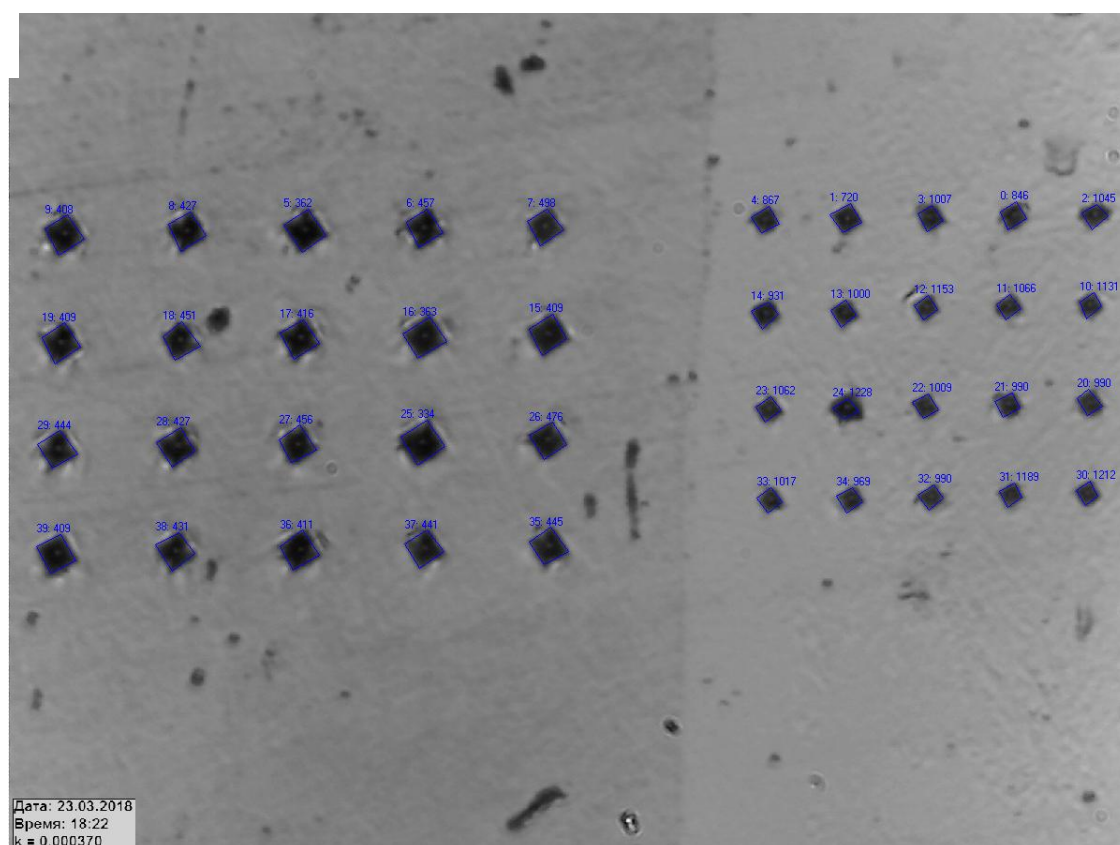


Рисунок 4.8 – Образец № 3. Фотография шлифа (поперечного среза) образца с электроискровым упрочнением с нанесенной на поверхность специальной пастой. Увеличение 370. Измерение микротвердости по методу Виккерса.

Измерительный комплекс КМТ-1

наплавленный слой однороден, однако в нем наблюдаются немногочисленные поры с ровными краями. Граница перехода четкая. Микротвердость исследовалась на наплавленном слое, а так же на материале основы. Было проставлено 40 отпечатков: на наплавленном слое 20 отпечатков, на материале основы 20 отпечатков. Значения микротвердости образца № 3, полученные в области границы двух зон, приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Значения микротвердости образца № 3

Исследуемая область	Значение микротвердости, кгс/мм ²				Среднее значение микротвердости, кгс/мм ²
Зона основного материала	405	409	444	409	417
	427	451	427	431	434
	362	416	456	411	411
	457	363	334	441	399
	498	409	476	445	457
Среднее значение микротвердости материала основы, кгс/мм ²					423
Зона покрытия	867	931	1062	1017	969
	720	1000	1228	969	979
	1007	1153	1009	990	1040
	846	1066	990	1189	1023
	1045	1131	990	1212	1095
Среднее значение микротвердости материала покрытия, кгс/мм ²					1021

Вывод: среднее значение микротвердости материала основы составило 423 кгс/мм². Среднее значение микротвердости материала покрытия составило 1021 кгс/мм².

Проведем анализ полученных результатов. Сопоставление полученных данных по электроискровому упрочнению образцов из стали Ст. 45 показывает, что рассматриваемый метод позволяет повысить микротвердость металлических поверхностей изделий порядка трех раз, а при использовании специальных паст с металлокерамическими порошками – более 3,5 раз. Глубина упрочненного слоя поверхности составляет порядка 0,3 мм. Кроме этого происходит упрочнение и приграничной зоны основы обработанного слоя. Общая глубина обработки поверхности изделия находится в пределах от двух до трех мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проделанной работы получены следующие результаты:

1. В главе 1 НКР проведен обзор состояния методов дуговой металлизации и электроискрового упрочнения поверхностей. Сделаны следующие выводы:

- процесс электродуговой металлизации известен давно и, начиная с 50-х годов прошлого столетия, широко применяется для антикоррозионной защиты металлоконструкций. Он используется как в машиностроительном, так и в ремонтном производстве. С учетом, что задачей НКР были вопросы восстановления деталей сельскохозяйственных машин с повышенными физико-механическими свойствами, основной упор в работе необходимо сделать на исследовании и применении электроискрового разряда;
- электроискровой метод нанесения металлопокрытий обладает высокой эффективностью, экономичностью и универсальностью; он перспективен для широкого использования на предприятиях разных отраслей экономики, включая оборонную промышленность, для увеличения ресурса и восстановления работоспособности деталей и инструментов;
- наличие сложных электрофизических и электрохимических процессов при электроискровой обработке поверхностей с электродами из различных материалов в различной газовой среде и в присутствии различных легирующих твердосплавных порошков создает предпосылки для проведения широкомасштабных НИОКР, как по самим технологическим процессам электроискровой обработки, так и по разработке более совершенных устройств электроискрового легирования.

2. В главе 2 рассмотрены теоретические аспекты исследований технологий дуговой металлизации и электроискровой обработки. Сделаны следующие выводы:

- показано, что при электродуговой металлизации формирование покрытий будет сопровождаться высокими остаточными растягивающими напряжениями, пористостью и анизотропией свойств покрытий, что не обеспечивает необходимую надежность деталей, особенно в ответственных и

высоконагруженных узлах. Эти обстоятельства требуют учета этих факторов при математическом моделировании процесса дуговой металлизации;

- для качественного формирования покрытия при электродуговой металлизации необходима организация высокоскоростного источника расплавленных напыляемых частиц в газовой среде с нейтральным или восстановительным потенциалом. При этом необходимо учесть особенности динамики потока, массу и скорость напыляемых частиц, их энергетические и скоростные характеристики, температуру подложки;

- модифицирование и упрочнение поверхностного слоя происходит благодаря следующим процессам:

- осаждение (конденсация) материала анода на поверхности катода;
- диффузия частиц материала анода в поверхностный слой материала катода;
- образование твердых растворов и химических соединений (оксиды, карбиды, интерметаллиды);
- образование зоны взаимной кристаллизации Me_1 и Me_2 , неравновесных структур, фаз, а также мелкозернистой структуры;
- разработана термодинамическая модель процесса структурной модификации при электроискровой обработке. Показано, что она позволяет показать взаимосвязь физико-химических процессов эргомассопереноса и формирования модифицированных структур в поверхностном слое и покрытиях на обрабатываемой поверхности.

3. В главе 3 изучены и описаны электродуговой металлизатор ЭДМ-11ШД и комбинированная установка электроискрового и вибродугового упрочнения поверхностей металлических изделий ЦМТ-3. Приведены методы осциллографических исследований, фотографических исследований топографии обработанной поверхности электроискровым разрядом и электрофизические методы исследования структуры поверхностного слоя обработанного изделия электроискровым разрядом.

4. В главе 4 проведены экспериментальные исследования влияния

электроискрового разряда на физико-механические свойства поверхностного слоя изделия. Сделаны следующие выводы:

- изучена вольт-амперная характеристика электроискрового разряда. ВАХ электроискрового разряда должна была быть резко падающей. Однако она оказалась восходящей и далее резко падающей. Анализ показал, что здесь нами не учтен третий параметр в этом процессе. Это – изменение межэлектродного расстояния во времени.

- обработка металлических поверхностей электроискровым разрядом резко ухудшает класс шероховатости поверхности, но при этом качественные характеристики поверхности детали, как твердость, износостойкость, коэффициент трения и др. существенно улучшаются. Изучение вопроса показало, что и в данном случае можно обойтись без заметного ухудшения класса шероховатости поверхности за счет ее шлифования и полировки с применением алмазных кругов и паст. Особенно это требуется при упрочнении поверхностей различных штампов.

- изучение структуры и состояния поверхностного слоя образца после обработки электроискровым разрядом показало следующее:

- видимые изменения поверхностного слоя образца происходят на глубину порядка 0,3 мм. При этом упрочненный слой увеличивается ~ на 20 мкм, а его твердость становится порядка 70 HRC;

- металлографические исследования доказали, что электроискровое упрочнение металлических поверхностей (в наших экспериментах образцов из стали Ст. 45) позволяет повысить микротвердость металлических поверхностей изделий порядка трех раз, а при использовании специальных паст с металлокерамическими порошками – более 3,5 раз. При этом не только происходит упрочнение поверхностного слоя на глубину порядка 0,3 мм, но и упрочняется приграничная зона основы обработанного слоя. Общая глубина обработки поверхности изделия находится в пределах от двух до трех мм.

5. По результатам работы имеется 10 публикаций [45 – 54].

Список использованных источников

1. Иванов В.И. Состояние и развитие электроискровых технологий и оборудования в России и за рубежом [Текст] /В.И. Иванов, Ф.Х. Бурумкулов //Труды ГОСНИТИ. – 2012.– Т.109. –Ч. 2. – С. 127–139.
2. Лялякин В.П. Состояние и перспективы ремонта машин в АПК [Текст] /В.П. Лялякин //Труды ГОСНИТИ. – 2008. – Т. 101. – С. 33–37.
3. Черноиванов В.И. Ресурсосберегающие восстановительно-упрочняющие технологии – основа вторичного производства деталей [Текст] /В.И. Черноиванов, В.П. Лялякин, Н.Н. Литовченко /Вестник Орловского государственного аграрного университета. – 2009. – Т. 16. – № 1. – С. 2–5.
4. Dallaraire S. Hard arc-sprayed coating with enhanced erosion and abrasion wear resistance /Dallaraire S. //roc. of the ITSC'2000. Montreal, Quebec, Canada, 8–11 May, 2000. – ASM International. – Pp. 575–582.
5. Похмурский В. И. Влияние режимов электродуговой металлизации и составов применяемых порошковых проволок на структуру и абразивную стойкость покрытий [Текст] /В. И. Похмурский, М. М. Студент, И. А. Рябцев и др. //Автоматическая сварка. – 2006. – № 7. – С. 31 – 36.
6. Литовченко Н.Н. Пути совершенствования оборудования и технологии электродуговой металлизации /Н.Н. Литовченко, В.Н. Логачев [Текст] //Тракторы и сельхозмашины. – 2013 . – № 11. – С. 60 – 62.
7. Борисов Ю.С. Исследование диспергирования разнородных проволоочных материалов в процессе электродугового напыления [Текст] /Ю. С. Борисов, Н. В. Вигилянская, И. А. Демьянов и др. //Автоматическая сварка. – 2013. – № 2. – С. 25 – 31.
8. Бороненков В. Н. Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности [Текст] /В.Н. Бороненков, Ю.С. Коробов. – Екатеринбург: Изд-во УрГУ. – 2012. – 265 с.
9. Окладников С.И. Повышение эксплуатационных свойств покрытий при электродуговой металлизации [Текст]. Дисс... канд.техн. наук. – Комсомольск-на-Амуре. – 2002. – 121 с.

10. Бурумкулов Ф.Х. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) [Текст] /Ф.Х. Бурумкулов, П.П. Лезин, П.В. Сенини др. – Саранск: Красный Октябрь. – 2003.–504 с.
11. Иванов В. И. Повышение ресурса разделительных штампов путем упрочнения и восстановления их электроискровым легированием [Текст] / Автореф. дисс. на соиск. уч. степ.канд. техн. наук. – Саранск. – 2000. - 27 с.
12. Михайлюк А.И. Особенности механизма пластической деформации электроискровых покрытий и пути повышения их прочностных характеристик при трении [Текст] /А.И.Михайлюк, Р.П. Житару.– Электронная обработка материалов. – 2008. – № 5. – С. 49–56.
13. Михайлюк А.И. Возможности электроискровой обработки в улучшении пластических свойств деформируемых поверхностей [Текст] /А.И. Михайлюк, Р.П. Житару, А.Е. Гитлевич. – Труды ГОСНИТИ. – 2010. – Т. 106. – С. 115 – 119.
14. Верхотуров А.Д. Зависимость химического, фазового состава и свойств электроискровых покрытий от состава легирующих материалов [Текст] /А.Д. Верхотуров, В.П. Лунева. – Труды ГОСНИТИ. – 2010. – Т. 106. – С. 128 – 121.
15. Парамонов А.М. Нанесение электроискровым способом коррозионностойких покрытий [Текст] /А.М. Парамонов, С.П. Паршутин, А.В. Коваль, Н.С. Шолтоян. – Труды ГОСНИТИ. – 2010. – Т. 106. – С. 91 – 93.
16. Бурумкулов Ф.Х. Восстановление и легирование сплавов на медной основе электроискровой обработкой в газовой среде /Ф.Х. Бурумкулов, Р.Н. Задорожний, А.В. Потапов. – Труды ГОСНИТИ. – 2010. – Т. 106. – С. 25 – 30.
17. Михайлюк А.И. Применение графита в электроискровых технологиях [Текст] /А.И. Михайлюк, А.Е. Гитлевич. – Труды ГОСНИТИ. – 2010. – Т. 106. – С. 120 – 124.
18. Грачев М.В. Фазовый и элементный состав поверхностного состава после

- электроискрового легирования [Текст] /М.В. Грачев, Л.В. Денисов, А.Г. Бойцов. – Труды ГОСНИТИ. – 2010. – Т. 106. – С. 47 – 49.
19. Иванов В.И. Классификация объектов, методологические и технологические особенности электроискрового упрочнения и увеличения ресурса [Текст] /В.И. Иванов. – Труды ГОСНИТИ. – 2010. – Т. 106. – С. 31 – 41.
20. Михайлов В.В. Электроискровое легирование титана и его сплавов, физико-технологические аспекты и возможность практического использования. Краткий обзор. Часть I. Особенности массопереноса, структурные и фазовые превращения в поверхностных слоях, их износо- и жаростойкость /В.В. Михайлов, А.Е. Гитлевич, А.Д. Верхотуров и др.– Электронная обработка материалов.– 2013. –№ 49(5). –С. 21 – 44.
21. Верхотуров А. Д. О физической природе эрозии и формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании молибдена пористыми электродами железа[Текст] /А.Д. Верхотуров и др. //Порошковая металлургия. – 1983. – №. 12. – С. 51 – 54.
22. Михайлюк А. И. Особенности механизма пластической деформации электроискровых покрытий и пути повышения их прочностных характеристик при трении [Текст] /А.И. Михайлюк, Р.П. Житару //Электронная обработка материалов. – 2008. – №. 5. – С. 49 – 56.
23. Журавлев М.В. Очистка и модификация поверхности нелегированной низкоуглеродистой стали электроискровым методом в газе атмосферного давления [Текст]. Дисс... канд. техн. наук. – Томск. – 2015. – 104 с.
24. Алимбаева Б.Ш. Разработка и оптимизация износостойких покрытий на стальной подложке, синтезируемых методом электроискровой обработки [Текст]. Дисс... канд. техн. наук. – Омск. – 2014. – 124 с.
25. Кудинов, В. В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий [Текст] /В. В. Кудинов, В. М. Иванов. – М.: Машиностроение, 1981. – 192 с.
26. Урюков, В. А. Проблемы взаимодействия частиц с поверхностью [Текст] /В. А. Урюков //Теоретические и экспериментальные проблемы взаимодействия

частиц с поверхностью: Сб. науч. тр. – Киев: Ин-т сверхтвердых материалов АН УССР, 1988. – С. 4-14.

27. Исследование зависимостей между подводимой мощностью, эффективностью нанесения и прочностью сцепления плазмонапыленных покрытий из порошкообразных сплавов на основе Ni и Fe [Текст] / ВЦП. – № КМ-91553. – Киев, 01.03.87. – 10 с. – Пер. ст. : Binshi Xu, Zhonghiang Hu из сб. : *Advances in Thermal Spraying*. – 1986. – P. 315-321.

28. Тушинский, Л. И. Методы исследований материалов: Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий [Текст] /Л. И. Тушинский, А. В. Плохов, А. О. Токарев, В. И. Синдеев. – М. : Мир, 2004. – 384 с.

29. Хасуй, А. Техника напыления. Пер. с японского [Текст] /А. Хасуй. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.

30. Кудинов, В. В. Нанесение покрытий плазмой [Текст] /В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшев, В. Е. Белашенко и др. – М. : Наука, 1990. – 480 с.

31. Гоц, А. В. Физико-химические процессы окисления и плавления порошка в плазменной струе [Текст] /А. В. Гоц, В. А. Ахатов //Вопросы производства и обработки стали: Темат. сб. науч. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1983. – С. 69 74.

32. Черноиванов, В. И. Организация и технология восстановления деталей машин [Текст] / В. И. Черноиванов. – М. : Агропромиздат, 1989. – 336 с.

33. Харламов, Ю. А. Влияние скорости и температуры частиц на динамику и теплофизику их взаимодействия с поверхностью детали при газотермическом нанесении покрытий [Текст] /Ю. А. Харламов //Теоретические и экспериментальные проблемы взаимодействия частиц с поверхностью: Сб. науч. тр. – Киев : Ин-т сверхтвердых материалов АН УССР, 1988. – С. 25 – 33.

34. Харламов, Ю. А. Влияние скорости соударения на термический цикл в контакте между расплавленной частицей и поверхностью твердого тела [Текст] /Ю. А. Харламов //Физика и химия обработки материалов. – 1987. – №6. – С. 82 – 87.

35. Кадырметов, А. М. Воздушно-плазменное напыление при модуляции электрических и газодинамических параметров: Обзор по данным

отечественной и зарубежной печати за 1957-1995 г.г. [Текст] / А.М. Кадырметов; ВГЛТА. – Воронеж, 1996. – 60 с.: ил. – Библиогр.: с. 51 – 59. Деп. в ВИНТИ 30.05.96, N1799–В96.

36. Харламов, Ю. А. Особенности тепловых расчетов при газотермическом нанесении покрытий [Текст] /Ю. А. Харламов //Сварочное производство. – 1988. – №9. – С. 30 – 32.

37. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровой способ изменения исходных свойств металлических поверхностей [Текст] / Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 177 с.

38. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании [Текст] / А.Д. Верхотуров – Владивосток: Дальнаука. – 1995. – 323 с.

39. Коротаев, Д.Н. Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электроискровым легированием [Текст] / Д.Н. Коротаев. – Омск: СибАди, 2009. – 256 с.

40. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии [Текст] /В.Л. Миронов. – М.: Техносфера. – 2009. – 144 с.

41. Гоулдстейн, Дж. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: в 2 т. [Текст] /Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбери, П. Эчлин и др. – М.: Мир, 1984.

42. Weillie Zhou. Scanning Microscopy for Nanotechnology (Techniques and Applications). /Weillie Zhou (Ed.) Zhong Lin Wang (Ed.) Springer. – 2006. – 522 p.

43. Бухараев А.А. Диагностика поверхности с помощью сканирующей силовой микроскопии (обзор) [Текст] /А.А. Бухараев, Д.Б. Овчинников, А.А. Бухараева //Заводская Лаборатория. Исследование структуры и свойств. Физические методы исследования и контроля. – 1996. – №1. - С.10 – 27.

44. Калинин Е.Ю. Исследование физико-механических свойств поверхностных слоев, формируемых газотермическим напылением [Текст] /Е.Ю. Калинин, И.О. Соколов //Вестник Полоцкого государственного университета. – Серия В73. – 2013. – С. 73 – 79.

45. Байниязова А.Т. Перспективы использования дуговой металлизации при восстановлении деталей сельскохозяйственных машин [Текст] /А.Т. Байниязова, Н.Р. Адигамов //Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы», г. Казань. – 2016. – С.
46. Байниязова А.Т. Пути обеспечения заданной износостойкостью при сверх звуковой металлизации [Текст] /А.Т. Байниязова, Н.Р. Адигамов //Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы», г. Казань. – 2016. – С.
47. Байниязова А.Т. Перспективы применения порошковых технологий для получения поверхностей с заданными физико-механическими свойствами [Текст] /А.Т. Байниязова, Н.Р. Адигамов //Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Современное состояние, проблемы и перспективы развития сервиса агропромышленного комплекса» г. Казань. – 2017. – С.
48. Байниязова А.Т. Исследование физико-механических свойств упрочненных поверхностей [Текст] /А.Т. Байниязова, Н.Р. Адигамов //Сборник трудов 75-ой студенческой (региональной) научной конференции «Студенческая наука – аграрному производству». – 2017. – С.
49. Байниязова А.Т. Влияние режимов электродуговой металлизации и составов применяемых порошковых проволок на структуру и абразивную износостойкость покрытий [Текст] /А.Т. Байниязова, Н.Р. Адигамов /А.Т. Байниязова, Н.Р. Адигамов //Научные труды региональной научно-практической конференции «АГРОИНЖЕНЕРНАЯ НАУКА XXI ВЕКА». – 2018. – С.
50. Байниязова А.Т. Анализ способов восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин [Текст] /А.Т. Байниязова, Н.Р. Адигамов //Научные труды региональной научно-практической конференции «АГРОИНЖЕНЕРНАЯ НАУКА XXI ВЕКА». – 2018. – С.

51. Байниязова А.Т. Повышение эффективности металлизации при восстановлении деталей СХМ /А.Т. Байниязова, Н.Р. Адигамов /А.Т. Байниязова, Н.Р. Адигамов //Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Современное состояние, проблемы и перспективы развития механизации и технического сервиса агропромышленного комплекса». – 2018. – С.

52. Байниязова А.Т. Методика экспериментальных исследований упрочнения поверхностей микроплазменным дуговым разрядом [Текст] /А.Т. Байниязова, Н.Р. Адигамов //Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Современное состояние, проблемы и перспективы развития механизации и технического сервиса агропромышленного комплекса». – 2018. – С.

53. Байниязова А.Т. Повышение физико-механических свойств покрытий, нанесенных методом электродуговой металлизации [Текст] /А.Т. Байниязова, Н.Р. Адигамов //Сборник трудов 76-ой Международной студенческой научной конференции «Студенческая наука- аграрному производству». – 2018. – С.

54. Байниязова А.Т. Анализ процесса электродуговой металлизации с использованием металлических порошков [Текст] /А.Т. Байниязова, Н.Р. Адигамов //Сборник трудов 76-ой Международной студенческой научной конференции «Студенческая наука- аграрному производству». – 2018. – С.

