

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (МАИ)**

На правах рукописи

Денисов Леонид Владимирович



**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ
ГТД ЛОКАЛЬНЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ**

05.07.05 — "Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов"

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
Бойцов Алексей Георгиевич

Москва 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	12
1.1. Технологические методы нанесения защитных покрытий.....	12
1.2. Методы повышения работоспособности поверхностных слоев и восстановления рабочих поверхностей деталей методом ЭИЛ.....	18
1.3. Физические основы процесса ЭИЛ.....	23
1.3.1. Пробой МЭП	23
1.3.2. Обобщенный процесс электрической эрозии	24
1.4. Технологические решения и разработки, предпринимаемые в области электроискровых процессов	25
1.5. Математические модели и теоретические исследования, направленные на оптимизацию и совершенствование электроискровых процессов	30
1.6. Постановка цели и задач исследований.....	34
1.7. Выводы	35
1.8. Цели и задачи исследований.....	36
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	38
2.1. Материалы и изделия для исследований.....	38
2.2. Технологическое оборудование электроискрового упрочнения и легирования	38
2.3. Методика, приборы и установки для испытания и оценки свойств упрочненных поверхностей.....	41
2.3.2. Определение антифрикционных свойств и износостойкости покрытий	41
Выводы по главе 2	46
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ И ЛЕГИРОВАНИЯ	47
3.1. Модель формирования ЛС при ЭИЛ	47
3.2. Моделирование формирования остаточных напряжений	59
3.3. Обеспечение равномерности электроискрового упрочнения поверхностей деталей	68
Выводы по главе 3	77

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ НА СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ.....	79
4.1. Экспериментальные исследования формирования ЛС и массопереноса между сопряженными электродами.....	79
4.2. Топография и микрогеометрия упрочненных поверхностей	84
4.3. Влияние предварительного напряженного состояния на особенности формирования остаточных напряжений в поверхностном слое	86
4.4. Локальное карбоксирирование титановых сплавов	93
Выводы по главе 4	101
ГЛАВА 5. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ И ЛЕГИРОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ ГТД, ИХ АГРЕГАТОВ, ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ	103
5.1. Сфера применения ЭИЛ и комбинированных методов на его основе для повышения эксплуатационных свойств и восстановления деталей ГТД.....	103
5.2. Упрочнение гидроцилиндров ГТД.....	106
5.3. Оборудование и оснастка для выполнения упрочнения.....	119
5.4. Программное обеспечение ЧПУ и комбинированного упрочнения типовых деталей и поверхностей.....	130
5.5. Рекомендации по применению электроискрового упрочнения, легирования и комбинированного упрочнения.....	135
Выводы по главе 5	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	137
ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ.....	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	153
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	156
Управляющая программа О1	156
Управляющая программа О2	157
Управляющая программа О3	158

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Современное производство такой наукоемкой продукции как двигатели авиационной и ракетной техники не возможно без совершенствования технологий и развития прогрессивных методов обработки, обеспечивающих работоспособность и позволяющих повысить их ресурс и надежность деталей и узлов в жестких условиях эксплуатации, при высоких температурах и в агрессивных средах.

Этим объясняется актуальность применения технологий поверхностного упрочнения. В настоящее время выполняются многочисленные исследования по новым способам нанесения многослойных и многокомпонентных защитных покрытий, внедряются в производство методы поверхностного легирования и упрочнения лазером, электронным лучом, электрическим разрядом, совершенствуются процессы поверхностного пластического деформирования, газотермического напыления, наплавки и др.

Физические процессы, лежащие в основе ЭИЛ, позволяют получать уникальные по свойствам комплексные покрытия и ЛС на основе керамических и металлических износостойких, антифрикционных и жаростойких соединений, сплавов, с метастабильными кристаллическими и аморфными фазами. Проведение исследований, направленных на разработку теоретических и практических вопросов создания на основе ЭИЛ новых эффективных технологий локального нанесения покрытий различного назначения, комбинированного поверхностного упрочнения, наплавки и восстановления изношенных поверхностей является актуальной научной и практической задачей, на решение которой направлена настоящая работа.

Степень разработанности темы исследования. Процессы ЭИЛ применяемые для упрочнения, восстановления изношенных деталей и физико-химического модифицирования поверхностей, находят применение в основном и вспомогательном производстве двигателей летательных аппаратов благодаря высокой эффективности, широким технологическим возможностям и сравнительно низкой стоимостью реализации. Так, при производстве двигателя АЛ-31 технологии ЭИЛ применялись для упрочнения 38 деталей различного назначения. Простота автоматизации, технологическая надежность, локальность нанесения упрочненных слоев непосредственно снижают затраты и упрощают процесс обработки и восстановления деталей, в том числе, имеющих поверхности сложной формы.

ЭИЛ основано на явлении электрической эрозии и полярного переноса материала с анода (инструмента) на катод (деталь) при протекании импульсных разрядов в газовой среде.

Метод ЭИЛ был разработан Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко [20]. Важнейшие теоретические выводы, закономерности и зависимости формирования электрического разряда в МЭП сформулированы в работах: Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко [55, 56], Б.Н. Золотых [44], А.Д. Верхотурова [7, 8, 107], В.И. Жура [72, 77], Б.А. Среброва и З.И. Владковой [69], Ю.И. Мулина [63], А.Г. Бойцова [6].

Наиболее существенный вклад в исследование физических явлений, наблюдаемых при ЭИЛ, выполнены его авторами Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко. Авторы установили основные закономерности формирования слоев на электродах, предложили физическую модель процесса, выявили основные направления развития технологических возможностей процесса ЭИЛ, разработали опытные и промышленные образцы оборудования для электроискровых процессов. Интерпретацией многих физических явлений при ЭИЛ занимались И.Г. Некрашевич и И.А. Бакуто, К.К. Намитоков и др. Особенности физико-химических и структурных превращений в поверхностных слоях электродов при ЭИЛ интенсивно изучались Л.С. Палатником, И.З. Могилевским и другими [20].

В наши дни значимые исследования в области электроискровых процессов проводятся в Институте прикладной физики АН РМ, Молдова (В.В. Михайлов, А.В. Рыбалко); Институте материаловедения ХНЦ ДВО РАН (А.Д. Верхотуров); Московском институте стали и сплавов (Е.А. Левашов) [67]; Институте проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины (А.В. Паустовский, М.С. Ковальченко). А так же таких компаниях, как: Advanced Surfaces & Processes, Inc., Орегон, США; The Hong Kong Polytechnic University, Китай (Т.М. Yue, Z.N. Guo); School of Science, Northeastern University, Китай; University of Technology, Багдад, Ирак; National Research and Development Institute for Welding and Material Testing - ISIM Тимишоара, Румыния и т.д.

Однако эффективность применения ЭИЛ, сдерживается недостаточной изученностью ряда факторов, технологических и металлургических аспектов, обеспечивающих управление структурой, фазовым и химическим составом ЛС, уровнем и знаком остаточных напряжений, и непосредственно влияющих на эксплуатационные свойства, производительность и технико-экономическую эффективность в целом. Необходимы исследования по упрочнению новых материалов, применению ЛЭ различного состава, дополнительных легирующих и защитных сред, позволяющих расширить область применения ЭИЛ и номенклатуру упрочняемых изделий. Также необходимы исследования в области моделирования, расчета и управления составом и структурой ЛС, многослойного и многокомпонентного легирования, устранения отрицательных сторон ЭИЛ, к которым относятся сравнительно низкая производительность с определенными предельными значениями по качественным и количественным показателям состояния поверхностного слоя, снижение усталостной прочности.

Объектом исследования являются технология поверхностного легирования методом ЭИЛ, и комбинированного упрочнения методом ЭИЛ и алмазного выглаживания рабочих поверхностей гидро– и пневмоцилиндров.

Предметом исследования является процесс формирования ЛС, его моделирование, состояние поверхностного слоя после ЭИЛ и алмазного выглаживания рабочих поверхностей гидро– и пневмоцилиндров.

Целью диссертационной работы является исследование процесса ЭИЛ, и создание на его основе новых высокоэффективных технологий комбинированного упрочнения, обеспечивающего повышение надежности, ресурса и работоспособности деталей и узлов авиационных двигателей.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи:**

- анализ состояния научной и практической составляющих технологии ЭИЛ;
- разработка теоретической модели формирования упрочненного ЛС требуемого состава, толщины, высокой равномерности и сплошности;
- разработка методики расчета и прогнозирования методом конечных элементов остаточных напряжений в поверхностном слое после ЭИЛ, и путей снижения остаточных напряжений в поверхностном слое для тонкостенных элементов;
- разработка технологии ЛКО рабочих поверхностей ГЦ, и рекомендаций по технологии алмазного выглаживания упрочненных поверхностей;
- предложены методики проведения испытаний и оценки служебных свойств упрочненных поверхностей;
- спроектированы оборудование и оснастка для выполнения ЛКО на серийных образцах изделий;
- разработан комплект управляющих программ для систем с ЧПУ, позволяющий реализовать возможности комбинированного упрочнения типовых деталей и поверхностей.

Научная новизна результатов исследований заключается в следующем.

На основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований решена важная научная проблема создания эффективных технологий комбинированного упрочнения, позволяющего получать ЛС с управлением их составом, толщиной и свойствами. Научной базой этих технологий являются:

- установленные функциональные связи величины массопереноса материала ЛЭ на обрабатываемую поверхность с отношением энергий, поступающих на сопряженные электроды, их электроэрозионной стойкостью, условиями выброса эродированного материала из зон воздействия электрических разрядов, скоростью перемещения ЛЭ;

– впервые выполнены комплексные исследования процесса ЛКО, включающие моделирование процесса формирования карбооксидного слоя на титановых сплавах, исследование влияния технологических факторов на производительность и качество получаемого покрытия, влияние на его состояния последующего алмазного выглаживания, позволившие оптимизировать процесс комбинированного упрочнения;

– экспериментально исследованы и теоретически обоснованы закономерности формирования остаточных напряжений в зависимости от режимов обработки, также влияние предварительно напряженного состояния на формирование остаточных напряжений при ЭИЛ.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы определяется:

– разработкой методик расчета технологических показателей комбинированного ЛКО, в частности, равномерности, сплошности и производительности упрочнения, толщины упрочненного слоя, распределения концентрации легирующих элементов по глубине поверхностного слоя;

– разработкой конструкций оборудования и технологической оснастки;

– разработкой компьютерных программ, позволяющих на основе математических моделей рассчитать необходимые технологические параметры процесса ЛКО.

Методология и методы исследования. При подготовке и проведении исследований применялась следующая нормативная документация. ГОСТ 24026-80 «Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения». Статистическая обработка результатов исследований производилась с использованием математического обеспечения ЭВМ. Экспресс-оценка эксплуатационных свойств упрочненных поверхностей производилась по предложенной методике. Был задействован программный комплекс Deform-2D, среда разработки программ Microsoft Visual C++.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

– модель формирования ЛС при ЭИЛ, учитывающую многократный перенос материала между поверхностями электродов, распределение третьего компонента в ЛС, перемещение электрода, выброс эродируемых материалов из зоны МЭП, соотношение количеств теплоты поступающих на электроды и позволяющую, на основе экспериментальных данных о сопротивлении электрической эрозии материалов электродов, прогнозировать состав и толщину ЛС;

– научные положения нанесения углеродосодержащих покрытий, с последующим выглаживанием (комбинированного ЛКО);

– результаты экспериментальных исследований влияния технологических факторов комбинированного ЛКО на качество формируемого покрытия;

– научные положения упрочнения ЭИЛ, с предварительным созданием на поверхности растягивающих (сжимающих) напряжений.

Достоверность основных положений, результатов, выводов основана на согласованности теоретических расчетов и результатов экспериментальных исследований, которые проводились по стандартизированным методикам с помощью аттестованной аппаратуры. Данные результаты не противоречат опубликованным данным других авторов.

Реализация и внедрение результатов работы. Разработанные технологии комбинированного ЛКО по обработке элементов деталей были внедрены при производстве опытных партий, а также серийном производстве изделий. Внедренная технология позволила повысить ресурс работы ГЦ изделий, уменьшить износ пары деталей втулка-поршень по сравнению с базовой.

Апробация результатов работы. Результаты диссертации отражены в 20 научных работах, три из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Получены два свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах:

– Всероссийская научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии – НМТ», МАТИ, г. Москва (2006, 2010, 2012 гг.);

– Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения», МАТИ, г. Москва, (2007-2010, 2013-2014, 2016 гг.);

– VI Всероссийская с международным участием научно-техническая конференция "Быстрозакаленные материалы и покрытия", МАТИ, г. Москва, 4-5 декабря 2007 г.;

– V Международный межотраслевой молодежный научно-технический форум «Молодежь и будущее авиации и космонавтики – 2013», ВВЦ, г. Москва, 26 ноября 2013 г.;

Личный вклад соискателя заключается в проведенном анализе технологии ЭИЛ. Разработанной модели формирования ЛС при ЭИЛ. Спроектированной установки для ЛКО, а также приспособления для алмазного выглаживания. Оптимизации технологических режимов ЛКО ГЦ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Объем диссертации занимает 160 страниц машинописного текста, включает в себя 86 иллюстраций, 5 таблиц, 168 наименований источников литературы и 6 страниц приложений.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований. Представлена степень её разработанности. Обоснована научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы. Изложена общая структура и характеристика работы.

В **первой главе** анализируются основные технологические методы нанесения защитных покрытий и упрочнения поверхностей деталей машин. Представлены различные варианты получения покрытий и восстановления изношенных поверхностей деталей методом ЭИЛ. Проведено сравнение и указаны преимущества и недостатки применения метода ЭИЛ по сравнению с другими технологиями упрочнения и легирования. Выполнен анализ исследований по физике процесса, а также технологических решений и разработок, предпринимаемых в области электроискровых процессов легирования и упрочнения. Рассмотрены математические модели и теоретические исследования, направленные на оптимизацию и совершенствование электроискровых процессов.

Показано, что традиционно применяемые способы повышения износостойкости деталей, а также методы восстановления и ремонта поврежденных элементов ГТД, имеют определенные недостатки, связанные с ограниченной прочностью сцепления покрытий с подложной, влиянием на структуру и свойства основного материала, сложностью реализации и др.

Электроискровые процессы формирования защитных и упрочняющих покрытий, нанесения слоев материалов, обеспечивающих восстановление изношенных поверхностей деталей, недостаточно изучены и необходимы дальнейшие разработки в этой области.

На основе проведенного обзора работ по ЭИЛ сформулированы цели и задачи исследования.

Во **второй главе** представлены материалы и изделия, на которых производились исследования. Рассмотрено технологическое оборудование для проведения экспериментов и контрольно-измерительное оборудование для исследования состояния покрытий. Описаны методики для проведения оценки служебных свойств упрочненных поверхностей.

Исследования по ЭИЛ и ЛКО, выполнялись на модернизированной установке с ЧПУ ELFA731 с независимым генератором импульсов ГТ-1Б, вырабатывающим импульсы постоянной полярности прямоугольной формы.

В **третьей главе** представлены результаты моделирования процесса ЭИЛ. Разработана феноменологическая модель формирования ЛС, которая позволяет прогнозировать его элементный состав в зависимости от режимов обработки и физико-химических свойств материалов электродов. На основе полученных данных можно прогнозировать поведение материала в МЭП, формирование ЛС, строить сложные зависимости распределения элементного состава ЛС по глубине.

Выполнено моделирование воздействия высококонцентрированного точечного источника тепла (единичный искровой разряд) на поверхность тонкостенного элемента. Получены значения остаточных напряжений и их распределение по толщине образца. Смоделирована, последовательно, серия групповых искровых разрядов на поверхности образца

с предварительно наведенными растягивающими и сжимающими напряжениями на легируемой поверхности.

Сделан вывод, что образцы с предварительно созданными растягивающими напряжениями после легирования и разневоливания имеют минимальные растягивающие напряжения на поверхности, а остаточные напряжения сжатия наиболее равномерно распределены по всей глубине пластины.

Рассмотрены особенности обеспечения равномерности упрочнения при использовании дискового электрода. Показано, что оптимальной является спиралевидная (возвратно-поступательная) траектория движения инструмента с углом наклона спирали, обеспечивающим взаимное перекрытие полос упрочненного материала.

Сделан вывод, что изменение величины МЭП оказывает сильное влияние на пятно контакта, только при близких по значению радиусах электрода и обрабатываемой цилиндрической поверхности. Что говорит о необходимости обеспечения стабильных технологических характеристик процесса ЭИЛ на начальных этапах обработки (когда инструмент менее изношен).

В **четвертой главе** проведены металлографические исследования формирования ЛС, экспериментальные исследования массопереноса между сопряженными электродами. Изучена топография и микрогеометрия упрочненных поверхностей.

Установлено, что остаточные напряжения растяжения увеличиваются с ростом тока короткого замыкания I , емкости разрядного конденсатора C , и сложным образом зависят от частоты импульсов f . Многослойное легирование увеличивает уровень остаточных напряжений.

Экспериментально установлено, что предварительное наведение растягивающих напряжений в приповерхностных объемах материала заготовки перед ЭИЛ позволяет получить в покрытии напряжения сжатия.

Для обеспечения требуемой шероховатости, повышения усталостной прочности, залечивания микротрещин, релаксации негативных остаточных напряжений и дополнительного упрочнения рекомендовано алмазное выглаживание или обкатка роликами (шариками). Комплексное применение ЛКО и поверхностно-пластического деформирования позволяют в два-три раза повысить износостойкость рабочих поверхностей деталей из титановых сплавов.

Экспресс испытания на износ, выполненные в условиях скольжения алмазного сферического индентора по упрочненной поверхности показали высокую прочность и износостойкость покрытия.

В **пятой главе** рассмотрена сфера применения процесса ЭИЛ в области повышения эксплуатационных свойств и восстановления деталей ГТД. Даны практические рекомендации.

Предложена технология упрочнения цилиндров ГТД. Разработан технологический процесс финишной операции нанесения износостойкого покрытия, с последующим алмазным выглаживанием на ГЦ различной номенклатуры. Для определения фазового состава получаемых покрытий проведены исследования образующихся в них соединений на порошковом рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance.

Испытания, выполненные на технологическом изделии, показали, что износ зеркала цилиндра за время наработки минимален, а его величина в два-три раза ниже, чем у ГЦ, обработанных по базовой технологии.

Для проведения поэтапных мероприятий ЛКО и алмазного выглаживания, направленных на повышение ресурса ГЦ, были спроектированы и изготовлены соответствующее оборудование и приспособление.

Даны рекомендации по применению ЭИЛ, и комбинированного упрочнения.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Технологические методы нанесения защитных покрытий

К двигателям пятого поколения предъявляются высокие требования. Основные элементы и узлы двигателя выполняются из эффективных материалов, обеспечивающих высокую удельную прочность, жаростойкость и жаропрочность, сопротивление коррозии, способных работать при высоких температурах, при этом обладать низким коэффициентом температурного расширения.

Материалы, применяемые при производстве газотурбинных двигателей, условно, можно разделить на следующие группы:

1. стали сплавы;
 - 1.1. стали;
 - 1.2. титановые сплавы;
 - 1.3. алюминиевые сплавы, медные сплавы и т.д.;
2. металлокерамики, композиционные керамики и т.д.;
3. интерметаллические соединения (Ti_3Al , Ni_3Al , Ti_3Ni , W_4Ni , $MoNi$, Ta_3Ni , Al_3Fe , $CuAl_2$ и др.).

На величину и характер износа влияет большое количество факторов, которые приводят к различным видам разрушения. В большинстве случаев повреждённые участки поверхности классифицируют в зависимости от вида трения и условий воздействия внешней среды [21].

При анализе разрушения и повреждений материалов и деталей машин выделяют следующие виды изнашивания [Там же] рисунок 1.1.

В основном, износ, превышающий 0,1–1,0 мм не допускает последующую эксплуатацию узла или элемента в сборке без ремонта, в виду потери точности размеров, формы поверхностей, а также изменения условий взаимоконтактирования.

Например, для подшипников в узлах авиатехники, повреждения коррозионного характера допускаются при условии удаления зачисткой продуктов коррозии на нерабочих поверхностях (посадочные диаметры и торцы) [61]. Глубина снимаемого поверхностного слоя не должна превышать 0,1 мм.

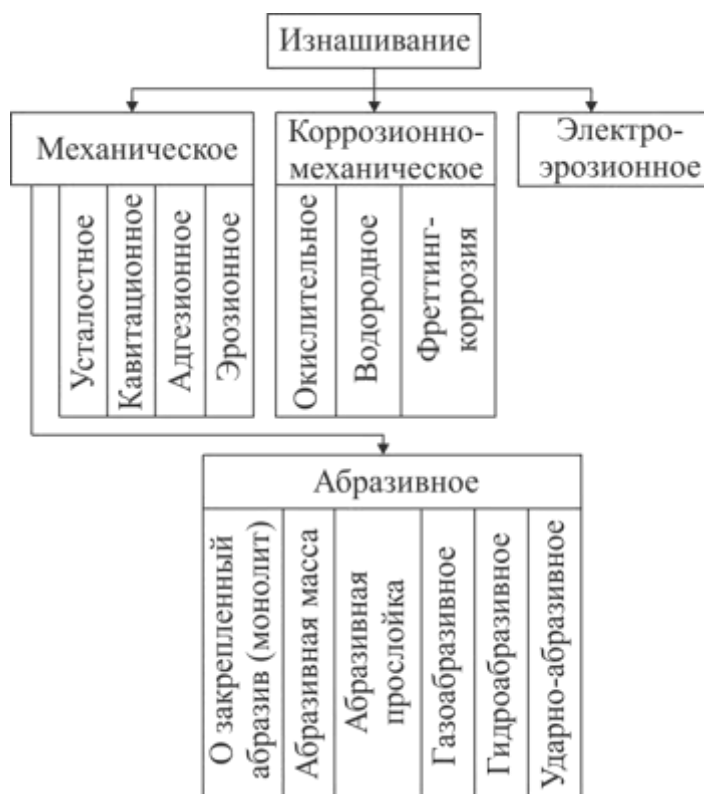


Рисунок 1.1 – Классификация видов и подвидов изнашивания

Ложное бринеллирование на рабочих поверхностях колец разборных подшипников, работающих в режиме качения, допускается:

- глубиной до 0,05 мм на подшипниках воздушных винтов самолетов и вертолетов;
- в виде бликовых отпечатков без образования лунок на подшипниках основных опор ГТД, поршневых двигателей и главных редукторов, полученных от колебательных нагрузок при транспортировке двигателя.

Для шарико- и роликоподшипников основных опор трансмиссии авиадвигателей и главных редукторов силовых установок, предназначенных для повторного использования, допускаются на поверхностях качения следующие повреждения (если нет особых ограничений):

- вмятины диаметром до 0,3 мм при наличии вспучивания материала и до 0,5 мм при отсутствии вспучивания материала по краям вмятин;
- риски на кольцах и роликах шириной до 0,15 мм, на шариках – до 0,1 мм;
- темные точки диаметром до 0,5 мм.

Для элементов, не являющихся парой трения и не участвующих в зацеплении или контакте с ответной парой (посадочная поверхность, опорная поверхность) износ может достигать свыше 1 мм и более. Однако это будет сопряжено с ухудшением эксплуатационных характеристик детали, снижением производительности, надежности узла или конструкции.

Например, зоны и размеры повреждений, допустимые без зачистки входной кромки лопатки первой ступени ротора КНД составляют не более 0,3 мм по глубине [25, 100].

Способами повышения износостойкости материалов и деталей машин являются [83, 19]:

– конструкционные способы: исключение внешнего трения, замена внешнего трения на внутреннее трение, обоснованный выбор материалов для трибосопряжений, замена трения скольжения трением качения, использование принципа податливости, улучшение условий трения, равностойкость изнашивающихся деталей, самоорганизация геометрической формы при изнашивании деталей, избирательный перенос;

– технологические способы: правильный выбор вида обработки и шероховатости поверхности, химико-термическая обработка, поверхностная закалка, электрохимические покрытия, наплавка износостойких слоев, напыление покрытий из порошковых материалов, плакирование, механическое упрочнение поверхностей;

– эксплуатационные: заключается в обеспечении исправного технического состояния машины во время эксплуатации и консервации, обеспечение безаварийной работы машины, периодической диагностике и своевременных ремонтах.

Рассмотрим подробнее способы повышения износостойкости материалов [89], позволяющие производить восстановление и ремонт поврежденных деталей [17], а также применяемые на сегодняшний момент методы восстановления элементов ГТД [100].

К ним относятся: наплавка, напыление, легирование и электролиз. Ниже представлена классификационная схема рассматриваемых методов (рис. 1.2).

Процесс наплавки покрытий происходит в условиях нанесения расплавленного материала на обрабатываемую поверхность, разогретую до температуры плавления. В основном для наплавки используют материалы порошковых смесей, позволяющие получать различные по химическому и фазовому составу покрытия. По прочности соединения покрытий с поверхностью соизмеримы с прочностью основного материала. Наплавкой получают покрытия толщиной от 0,1 до 5 мм и выше.

К негативным последствиям наплавки относят сильный нагрев материала детали, сопровождаемый выгоранием легирующих компонентов, переход через границу температуры фазовых превращений, возникающие остаточные напряжения, коробление детали [17].

Напыление представляет собой процесс переноса материала движущейся средой на поверхность детали. После нагрева и диспергирования напыляемый материал в пластичном или жидком состоянии, обладая большой кинетической и тепловой энергией, ударяется о поверхность детали, деформируется и закрепляется на ней.

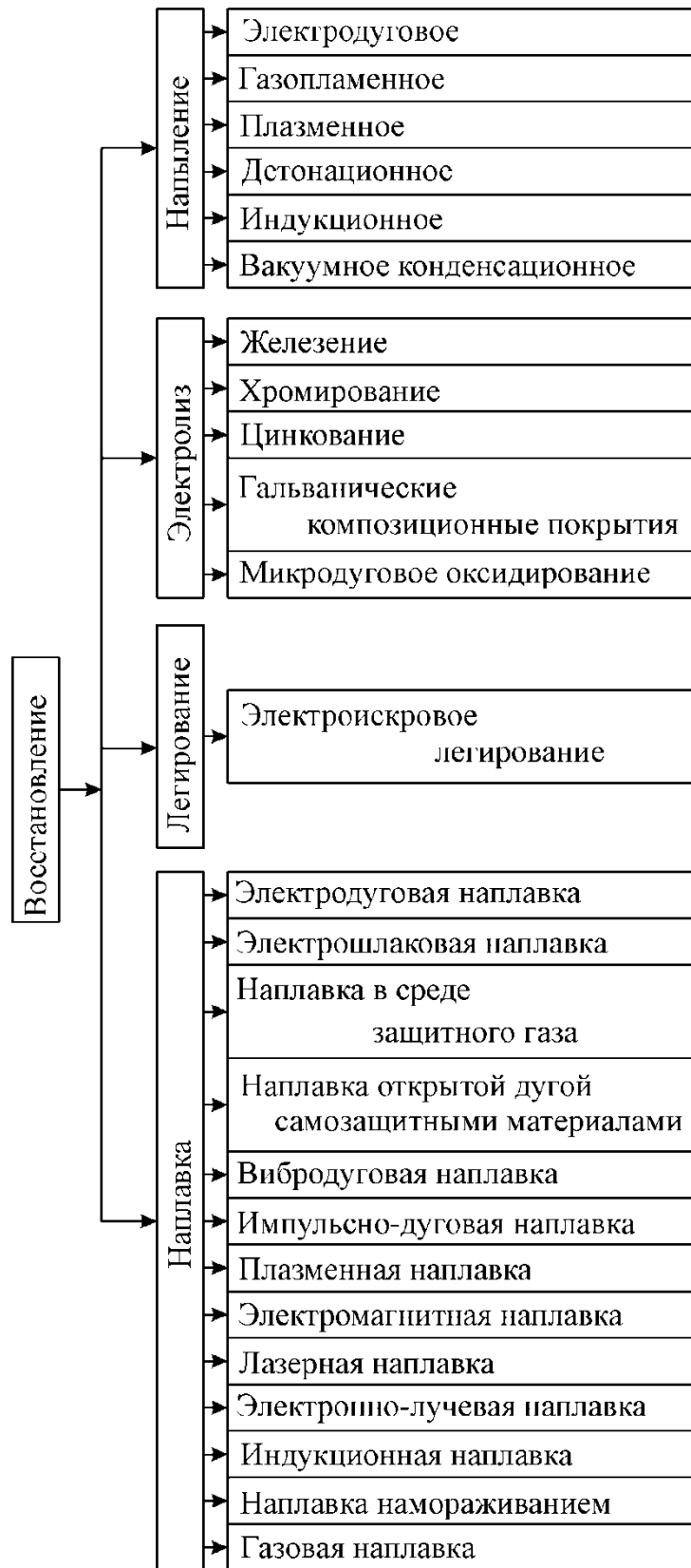


Рисунок 1.2 – Технологические способы восстановления и ремонта поврежденных деталей

При напылении поверхность основного металла не достигает температуры плавления. Соединение напыленного материала с поверхностью носит в основном механический характер, присутствуют силы физического взаимодействия (Ван-дер-Ваальса), силы металлической связи. Обладая большой кинетической энергией, при ударе о подложку осаждаемые частицы

материала испытывают пластическое деформирование, что приводит к наклепу материала, изменению текстуры покрытия и снижению его пористости. При напылении в качестве материалов используют проволоку или порошки [Там же].

К недостаткам относят невысокую адгезионную и когезионную прочность напыленного материала, выгорание легирующих элементов, окисление материала. В большинстве случаев необходима предварительная подготовка обрабатываемых поверхностей для увеличения прочности соединения покрытия с подложкой, обеспечения равномерной толщины покрытий. В некоторых случаях для снятия внутренних напряжений в покрытии и зоне его соединения с деталью следует проводить выдержку в термосе при температуре 150–200 °С в течение 1,0–1,5 часа [Там же].

Электролиз – процесс пространственного окисления (растворения) материала анода и восстановление (осаждение) металла на поверхности катода в электролите при подключении электродов к источнику питания.

Гальванические покрытия при восстановлении применяют:

- наращивание и повышение износостойкости поверхностей (хром, железо, никель, медь);
- придание защитных и антифрикционных свойств (кадмий, свинец, железо, медь, цинк, олово);
- улучшение обрабатываемости трущихся поверхностей (медь, цинк, свинец, олово).

Гальваническим методом восстанавливают детали с небольшим износом. Восстановлению подвергаются поверхности клапанов, поршневых колец, шатунов, отверстий под подшипники в корпусных деталях. Покрытия обеспечивают повышенные требования по износостойкости, твердости, сплошности, прочности соединения с основой. При гальваническом осаждении отсутствует вложение тепла в материал детали.

К недостаткам относят низкую производительность. Необходимы подготовительные операции: механическую и электрохимическую обработку и очистку восстанавливаемых поверхностей, изоляцию поверхностей, не подлежащих восстановлению, последующую очистку детали после нанесения.

Для восстановления деталей ГТД широко применяют выше описанные методы. Например, при износе шейки вала или гнезда в корпусе, для восстановления посадок подшипников в узлы в соответствии с ТУ чертежа, разрешается на посадочные поверхности подшипников наносить дополнительный слой хрома или меди гальваническим способом, в том числе и на подшипники без износа посадочных поверхностей на подшипники 1ой категории, кроме оговоренных в специальных инструкциях или технических условиях. Толщина гальванического покрытия хрома для подшипников двигателей и редукторов не должна

превышать 0,05 мм на сторону; для подшипников систем управления толщина хрома допускается до 0,4 мм на сторону. Толщина слоя меди допускается до 0,01 мм на сторону [61].

Номенклатуру подшипников и толщину покрытия хрома устанавливают индивидуально в зависимости от условий их работы, назначения изделия.

Не допускаются: утолщение слоя по краям, «загар», пузыреобразование, непокрытые участки, отложение хрома на других поверхностях.

Учитывая, что основными эксплуатационными дефектами в отечественных и зарубежных двигателях являются [100]:

износ от фреттинг-коррозии – 60%;

механические повреждения – 10%;

термические и усталостные трещины – 25%;

эрозия – 5%.

В настоящее время указанные дефекты устраняют методами пайки, сварки и напылением.

Крупные повреждения, подлежащие ремонту, устраняют выборкой материала механическим способом. Затем осуществляется приварка нового вкладыша взамен удаленного фрагмента. Например, восстановление лопаток 1-й и 2-й ступеней КНД ведется путем вварки вставок электронно-лучевой сваркой, с последующей механической обработкой приваренного участка [Там же].

Пайка может применяться при ремонте элементов турбины, камеры сгорания, компрессора высокого давления.

Например, нанесение износостойких покрытий на боковые поверхности бандажных полок. Во время эксплуатации двигателя бандажные полки лопаток компрессора подвержены износу в наибольшей степени. Изготавливают лопатки из высокопрочных титановых сплавов, не совместимых по своим металлургическим свойствам со всеми известными износостойкими сплавами и композитами. В связи с этим процесс наплавки на контактные поверхности бандажных полок оказался не приемлем.

Методы напыления не обеспечили необходимой адгезионной прочности напыляемого материала к титановым сплавам. Для восстановления контактных поверхностей бандажных полок применили специально разработанный композиционный материал ВТН-1 (состоит из твердых частиц карбида вольфрама) и припой на титановой основе ВПр16 в качестве связки [Там же].

ЭИЛ, на примере двигателя АЛ-31Ф, в основном применяется для нанесения износостойких, упрочняющих покрытий на контактные поверхности. В частности наружные и внутренние кольцевые поверхности деталей наружного контура (шарниры, втулки,

обтюраторы, каретки и др.) из титановых сплавов легируются твердым сплавом Т15К6 и графитом. Торцевые поверхности замков статорных лопаток и уплотнительных секторов компрессора из титановых сплавов ВТЗ и ОТ4-1 легируются никелем [Там же].

В корпусе редуктора центральной коробки передач из сплава ВТ–20Л в местах посадки обойм подшипников отказались от нанесения гальванического никеля в пользу ЭИЛ сплавом Т15К6, что позволило улучшить работу на трение деталей из титановых сплавов, которые плохо работали на трение, особенно в паре друг с другом [Там же].

При использовании ЭИЛ дополнительной обработки легированных поверхностей не требуется. Допускается легкая доводка и полировка. В отдельных случаях, где к легированной поверхности предъявляются высокие требования по шероховатости, геометрии и размерам, доводку поверхности осуществляют механическим шлифованием эльборовым кругом [Там же].

1.2. Методы повышения работоспособности поверхностных слоев и восстановления рабочих поверхностей деталей методом ЭИЛ

Повышение надежности и ресурса, обеспечение работоспособности деталей и узлов в самых жестких условиях эксплуатации, при высоких температурах, действии динамических и контактных нагрузок не всегда возможно решить конструкторскими методами. В этом случае целесообразно применять технологии поверхностного упрочнения. Одним из таких методов является ЭИЛ.

Изнашивание деталей напрямую взаимосвязано с процессами, протекающими в ее приповерхностных слоях, различия и зависимости взаимодействия которых во многом обусловлены их физико-химическим состоянием. Механика контактного взаимодействия с сопряженной деталью, химические процессы, происходящие при воздействии внешней среды на рабочую поверхность, на протяжении всего эксплуатационного цикла определяют характер и специфику работы деталей.

Внедрение защитных, модифицирующих структуру, покрытий, изменение фазового состояния материала, формирование антифрикционных, коррозионностойких, жаропрочных свойств поверхности являются актуальной задачей.

Рассматриваемые мероприятия направлены на повышение служебных характеристик широкой номенклатуры деталей различного назначения, эксплуатируемых как в условиях контактного нагружения, так и воздействия агрессивных внешних сред.

Улучшить эксплуатационные свойства поверхностей можно технологическими методами повышения износостойкости деталей. Для этих целей применяют химико-термическую обработку, поверхностно-пластическое деформирование, гальванические покрытия (*Ni*, *Cr*, *Ag*, лужение), нанесение антифрикционных покрытий (вакуумные покрытия,

финишная безабразивная обработка), металлизацию напылением (детонационным, высокоскоростным газопламенным), наплавкой и напайкой высококонцентрированными потоками энергии (лазерным, плазменным, электроннолучевым методом) и ЭИЛ.

Экономически оправданным считается эксплуатационный метод повышения долговечности деталей. Он заключается в грамотной технической эксплуатации, периодической диагностике и своевременных ремонтах [99, 19, 83].

Технологические и эксплуатационные методы могут применяться для упрочнения, легирования и наплавки защитных покрытий на изношенные или подвергающиеся износу поверхности как перед вводом в эксплуатацию изделий, так и на протяжении всего периода ее работы во время плановых технических осмотров и профилактических ремонтов для поддержания требуемых значений размеров или восстановления необходимых свойств и характеристик поверхностного слоя или поверхности в целом.

Несомненным преимуществом технологии ЭИЛ является компактность, портативность оборудования, возможность ручного и автоматизированного процесса нанесения покрытий, легкая интеграция или дооснащение имеющимся на производстве механизированным оборудованием (рис. 1.3–1.6).



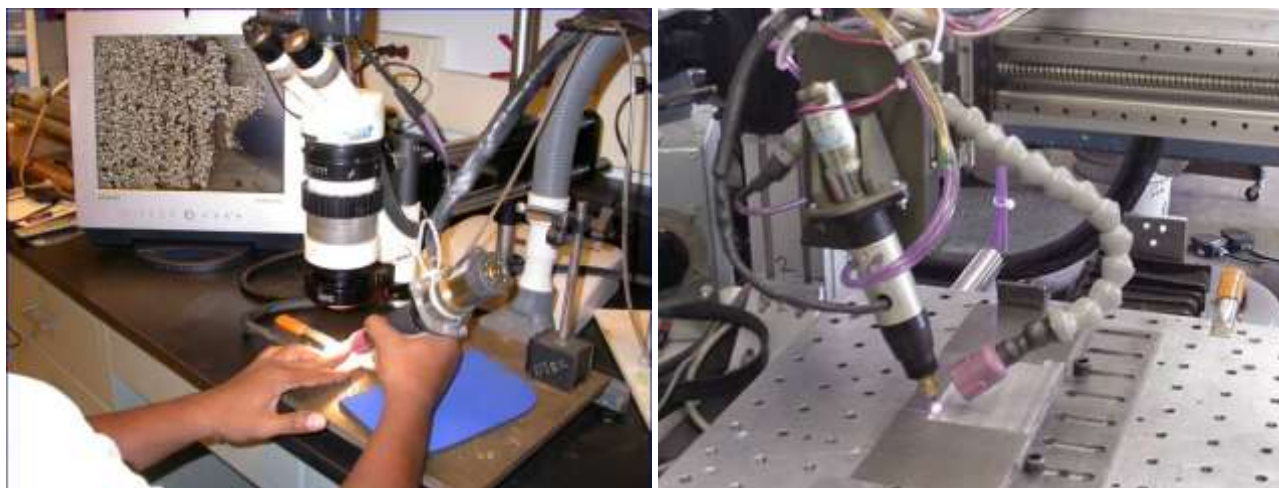
а)



б)

Рисунок 1.3 – Оборудование для ЭИЛ: блок управления и необходимые комплектующие (а); блок управления, оснащенный баллоном с защитным газом (б)

Процесс ЭИЛ характеризуется минимальными требованиями к подготовительным операциям перед нанесением покрытий. Например, для качественного формирования ЭИЛ покрытия технологический процесс при восстановлении рабочих лопаток [4] предусматривает подготовку эродированной поверхности лопаток зачисткой.



а)

б)

Рисунок 1.4 – Ручное легирование с дооснащенной цифровой системой визуализации (а); процесс легирования на базе установки механизированной портальной схемы (б)

Для удаления наиболее глубоких язвин используются вольфрам или молибден, имеющие высокие температуры плавления (соответственно 3411 и 2625 °С). Данными электродами формируется первый слой, одновременно переплавляющий поверхностный слой металла лопатки. При этом осуществляется обработка поверхности оставшихся язвин, выжигание оксидных продуктов с поверхности язвин.



а)

б)

Рисунок 1.5 – Роботизированная установка для ЭИЛ (а); блок управления, интегрированный с имеющимся на производстве станочным оборудованием (б)

Такая технология позволяет осуществлять минимум подготовительных операций шлифовкой и сохранять максимальной толщину лопатки. На подготовленную таким образом поверхность наносят второй слой покрытия из сплава ВЗК, который является рабочим, обеспечивая противозерозионную защиту (рис. 1.7).



а)



б)

Рисунок 1.6 – Компоновка мобильной установки для ЭИЛ (а); восстановление штока ГЦ ковша экскаватора в полевых условиях (б)

ЭИЛ применялось для создания защитных покрытий на штамповой оснастке [12, 47], режущем инструменте [76] из вольфрамосодержащих твердых сплавов [9, 125], быстрорежущей стали [124, 127]. Для восстановления валов сверхмощных генераторов [152], упрочнения и восстановления рабочих лопаток паровых турбин [4, 53].



а)



б)

Рисунок 1.7 – Нанесение защитных покрытий на элементы турбины: а) нанесение защитных покрытий на лопатки 29-й ступени при ремонте турбины К-300-240 ЛМЗ ОАО "Рязанская ГРЭС"; б) нанесение защитных покрытий на лопатки 30-й ступени при ремонте турбины ПТ-80-130/30 ЛМЗ АО "Кишиневская ТЭЦ-2" при расположении ротора на козлах ремонтной площадки

Формирования подслоя безалмазными и алмазосодержащими хромовыми электродами перед CVD нанесением адгезионно-прочных алмазных покрытий на твердом сплаве [94]. Для формирования подложки из активного металла с последующим нанесением покрытий другими методами [158]. Для упрочнения медицинского инструмента [68, 132], продления службы медных электродов точечной сварки [153, 156], повышения долговечности пятниковых узлов большегрузных вагонов [87], увеличения износостойкости литейной оснастки (4^x-5^{th} кратное снижение износа) [102, 129]. Для повышения долговечности деталей двигателей внутреннего сгорания [88], создания коррозионностойких покрытий [120, 52, 113], с целью повышения жаростойкости [14], борьбы с кавитационной эрозией [15], создания износостойких покрытий [157] СВС-электродными материалами [11, 18, 126], нанесения антифрикционных покрытий [111]. Для получения комплексных силицидных покрытий [48], термоэлектронной эмиссии [13]. Интерес к процессу ЭИЛ проявляется со стороны военных организаций [118, 128, 143, 130].

При легировании или наплавке на поверхности деталей следует учитывать следующие технологические особенности формируемых покрытий. Разное соотношение свойств подложки и упрочняемого слоя, в частности, микротвердости [146, 147], коэффициента термического расширения, электрохимических характеристик [108]. Все это может привести к неравномерной степени деформации. Неравномерная концентрация легирующих элементов по глубине станет причиной возникновения остаточных напряжений первого рода, градиентов твердости, оказывающих влияние на эксплуатационные характеристики поверхности и соответственно конструктивные свойства детали.

Во время эксплуатации деталей оптимальные параметры поверхностного слоя зависят от условий нагружения и окружающей среды. В определенных случаях необходимо создать высокую маслостойкость поверхности, обеспечить равномерное распределение контактных давлений. В подвижных элементах часто требуется провести оптимальные условия приработки поверхностей трения с различным классом шероховатости и твердостью. Износ мягкого тела может превысить допустимый задолго до наступления состояния приработки, что приведет к преждевременному выходу из строя узла.

В некоторых случаях необходимо прогнозировать поведение восстановленного участка материала в условиях не характерных для стандартного периода приработки, а также вновь возникающих и изменяющихся параметров несущей способности поверхностного слоя.

1.3. Физические основы процесса ЭИЛ

1.3.1. Пробой МЭП

ЭИЛ основано на явлении электрической эрозии и полярного переноса материала с анода (инструмента) на катод (деталь) при протекании импульсных разрядов в газовой среде. Метод ЭИЛ был разработан Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко [20].

Оптимальный диапазон рабочих напряжений, используемых при ЭИЛ, находится в пределах 15 ... 200 В [Там же]. Согласно источнику [51] следует, что при напряжениях меньше 220 В пробой между электродами до их контакта невозможен. Однако, в том же источнике, ссылаясь на серию исследований группой авторов [20] показано, что пробой при напряжениях $U_p = 100 - 200$ В может достигать 5...10 мкм. Авторы рассуждают [51], что на основании исследования упрочнения стали анодами из твердого сплава с использованием высокоскоростной киносъемки установлено контактное начало разряда при чистовом легировании ($U \leq 220$ В), основная энергия которого выделяется в течение 125 мкс независимо от режима работы. Пробой МЭП при зазоре более 0,1 мкм и ($U \leq 300$ В) может произойти только в присутствии посторонних частиц за счет контактного начала или под действием автоэлектронного тока.

Изучение МЭП при низких напряжениях провел К.К. Намитоков [65, 66]. Установлено, что в обычных условиях газовой среды, при $U < 300$ В, пробой наблюдается при межэлектродном зазоре в интервале 0,01–10 мкм. На его величину существенно влияют исходное состояние поверхности электродов и "загрязнения" в МЭП. При расстояниях 0,1–1 мкм пробой возникает под действием автоэлектронного тока большой плотности вызывающего появление между электродами высокотемпературной парообразной среды из материала электродов или взрывной эмиссии электронов [20].

В первый момент ЭИЛ вероятнее контактное начало разряда. В последующем пробой возникает преимущественно до контакта электродов, что обусловлено образованием в межэлектродном зазоре продуктов эрозии, от воздействия предыдущих импульсов. Этому способствует высокая температура рабочих поверхностей электродов (при длительном легировании локального участка 1–2 мин/см²) [51].

Схожие утверждения приводятся авторами [20]. В зазоре менее 0,1–1 мкм за счет пондеромоторных сил электростатического поля могут происходить механическое разрушение электродов и перекрытие зазора продуктами разрушения при ЭИЛ. Инициирование разряда будет носить контактный характер с взрывообразным расплавлением и испарением контактных "перемычек" и возбуждением разряда в парах материала электродов. Максимальное время, необходимое для возникновения контактных "перемычек", составляет 10^{-7} – 10^{-8} сек.

Подробные исследования влияния состояний поверхности электродов и межэлектродной среды на процесс пробоя показали, что инициирование разрядов при промежутках более 0,1–1 мкм обусловлено появлением в межэлектродном зазоре дисперсных частиц. Это могут быть как частицы, содержащиеся в газах в виде аэрозолей, так и частицы, находящиеся на поверхности электродов. Втянутые в зазор полем из межэлектродной среды или с поверхности электродов, они могут частично перекрывать МЭП, вызывая соответствующее перераспределение потенциала и появление автоэлектронной или взрывной эмиссии, или создавать перемишки, приводящие к контактному механизму инициирования разряда [Там же].

Один из возможных механизмов инициирования разряда частицами при относительно больших промежутках (5–10 мкм и более) состоит в том, что, попадая в зазор, частица электризуется и начинает перемещаться к катоду. Между частицей и катодом происходит микроразряд, и возникшее плазменное облако вызывает последующий пробой всего МЭП [Там же].

При ЭИЛ в условиях непрерывного изменения микрогеометрии поверхности электродов, наличия дисперсных частиц, периодического уменьшения МЭП до нуля возможны описанные механизмы пробоя, вклад каждого из которых требует учета конкретных условий проведения процесса. В случае контактного ЭИЛ создаются исключительно благоприятные условия для инициирования разряда частицами. При обработке в процессе электрической эрозии в зависимости от материала электродов и энергии разряда на поверхности катода в зоне воздействия импульсных разрядов может находиться от 2–5 до 20–30% эродированного материала электродов в виде свободных дисперсных частиц размером от 0,1 до 100 мкм и более. Эти частицы, попадая в зазор, являются одним из основных факторов, вызывающих пробой МЭП [Там же].

1.3.2. Обобщенный процесс электрической эрозии

После инициирования пробоя в МЭП формируется канал разряда. Газоразрядная плазма канала, взаимодействуя с локальными участками электродов, вызывает их разрушение – электрическую эрозию. В результате электрической эрозии материал электродов выбрасывается в МЭП в паровой и жидкокапельной фазах. Когда при электрической эрозии происходит хрупкое разрушение материала электродов, с паром и жидкостью в зазор может поступать и твердая фаза [Там же].

Электрическая эрозия в газах и жидкостях, обусловленная взаимодействием плазмы импульсного разряда с поверхностью электродов, является сложным комплексным процессом.

Авторы Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко [57, 58] показали, что в основе электрической эрозии при импульсных разрядах лежат электротермические процессы [20].

Более подробно рассмотрена причина возникновения твердой фазы авторами [51]. Поток электронов и ионов приводит к локальному разогреву электродов и образованию на их поверхности объемных источников тепла. От воздействия данных источников на аноде и катоде образуются эрозионные лунки, в которых выделяются три зоны: испарения, плавления и напряженного состояния. Высокие значения растягивающих напряжений на рабочей поверхности электрода являются основной причиной образования трещин и создания твердофазной эрозии.

Условием переноса материала с анода на катод является полярный эффект, заключающийся в том, что величина эрозии материала с анода превосходит величину эрозии материала с катода [Там же].

$$\frac{\Delta_a}{\Delta_T^k + \Delta_{\text{эр}}^k} = \frac{c_k \rho_k \lambda_k (T_{\text{пл}}^k - T_x^k)}{c_a \rho_a \lambda_a (T_{\text{пл}}^a - T_x^a)} \gg 1$$

где $\Delta_T^k, \Delta_{\text{эр}}^k$ – эрозия катода в твердой и жидко-паровой фазах;

Δ_a – эрозия материала анода;

c – теплоемкость материала;

ρ – плотность материала;

λ – теплопроводность материала;

$T_{\text{пл}}$ – температура плавления для материалов анода и катода;

T_x – температура хладоломкости для материалов анода и катода.

Помимо полярного эффекта, связанного со свойствами материалов электродов и параметрами импульсного разряда, на явление переноса значительно влияют свойства межэлектродной среды, величина МЭП, изменение свойств поверхности электродов в процессе обработки.

В результате большого числа факторов, влияющих на полярность переноса материала между электродами, становится затруднительно дать однозначную формулировку общего критерия переноса при ЭИЛ.

1.4. Технологические решения и разработки, предпринимаемые в области электроискровых процессов

Повышенный интерес к технологии ЭИЛ, востребованность данного процесса в различных отраслях, в некоторых случаях внедрение новых комбинированных методик на производстве и в обработке, совершенствуют и пополняют как теоретическую, так и практическую базу исследований данного процесса. Нестандартные решения задач,

возникающих перед технологами и необходимые для реализации исследований, непосредственно оказывают влияние на развитие перспективных направлений в области ЭИЛ.

В условиях совершенствования технологического оборудования и внедрения автоматизированных систем можно выделить различные направления в области развития ЭИЛ.

Непосредственное повышение качества легируемых поверхностей достигается использованием систем автоматизированного сопровождения процесса, совершенствованием интегральных микросхем генерирования параметров и режимов установок, внедрением принципиально новых подходов к обработке и отслеживанию анализируемых сигналов, сопутствующих физике и динамике протекающего процесса [116,122, 123, 139, 140, 148].

Развитие и внедрение перспективных материалов и композитов, сложных интерметаллидов, получение различных твердых растворов в легируемых слоях возможно при непосредственном совершенствовании состава, структуры и свойств применяемых электродов, легирующих элементов, катализаторов процесса, а также комбинировании таких возможностей [131, 138, 142, 149, 155].

Применение упрочняющих технологий в совокупности с процессами физико-химического модифицирования поверхности позволяют получить характеристики поверхностного слоя с заданными свойствами и значениями [133, 145, 159].

Патентный поиск выявил разнообразие в методах совершенствования технологического процесса ЭИЛ как в России, так и за рубежом. Разрабатываются конструкции, механизмы, как самих установок, так и отдельные их составляющие (источники питания, блоки управления к ним, следящие системы и т.д.) [103, 71, 64, 59, 2, 150, 135]. Применяется комбинирование процесса легирования с методами технологического улучшения, структурного изменения получаемой модифицированной поверхности [1, 137, 134, 117], методов восстановления поврежденных поверхностей [78, 79, 141]. Ведутся разработки более совершенных и востребованных материалов электродов [10, 82, 23, 101, 3, 136].

Анализируя имеющиеся публикации по ЭИЛ, выделим основные направления исследований и разработок предпринимаемых в этой области:

1) теоретические исследования механизмов электрической эрозии и массопереноса материала, формирования ЛС, влияние на него режимов обработки;

2) металлофизические и физико-химические исследования структуры, состава и свойств формируемого слоя, создание для таких целей новых легирующих материалов и технологии их получения;

3) разработка и совершенствование имеющихся процессов ЭИЛ, комбинирование с перспективными технологиями упрочнения и модифицирования поверхности;

4) исследование эксплуатационных свойств легированных поверхностей (износостойкость, усталостная прочность, антифрикционные свойства и др.) и их особенности на деталях различного назначения.

Важнейшие теоретические выводы, закономерности и зависимости формирования электрического разряда в МЭП сформулированы в работах: Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко [55, 56], Б.Н. Золотых [44], А.Д. Верхотурова [7, 8, 107], В.И. Жура [72, 77], Б.А. Среброва и З.И. Владковой [69], Ю.И. Мулина [63], А.Г. Бойцова [6].

Общее теоретическое обоснование процесса ЭИЛ представляется следующим. Эрозия может происходить в паровой, жидкой и твердой фазах. Выделяющаяся при этом энергия электрического разряда выбрасывает в МЭП расплавленный, растрескавшийся и испаренный материал под действием электродинамических и газодинамических сил. Получаемый слой с измененной структурой формируется в условиях многократного переноса материала между поверхностями сопряженных электродов, а также их химическим взаимодействием с внешней средой [28]. Причем на интенсивность и характер эрозии влияют теплофизические и механические свойства материалов электродов, а также внешние факторы сопутствующие данному явлению, что в большинстве случаев приводит к конкурирующим процессам и накладывает ограничивающие условия на толщину получаемого слоя [6].

Дополнительное внешнее воздействие на процесс формирования ЛС может интенсифицировать его, тем самым повысить эффективность ЭИЛ (нагрев или охлаждение упрочняемого изделия, наложение ультразвука, введение в МЭП веществ, влияющих на электроискровой процесс, гамма-излучение [104] и др.). Данным исследованиям посвящены множество работ, часть из которых, рассмотрена ниже.

Предварительный нагрев упрочняемого изделия во время ЭИЛ позволяет уменьшить неблагоприятное воздействие на усталостную прочность от микротрещин, образующихся в поверхностном слое после легирования [84].

Влияние ультразвуковых колебаний положительно сказывается на условиях инициирования электрических разрядов, увеличении коэффициента использования импульсов. В работе О.И. Зубаченко [85] сделан вывод, что воздействие ультразвуковых колебаний приводит к пластическому деформированию упрочняемого слоя. Установки для легирования с пьезогенераторами для электродов широко используются при ручной и полуавтоматизированной обработке на производстве.

В работе Н.Я. Парканского [16] было отмечено возрастание эрозии при растяжении и уменьшение при сжатии образцов. Управление остаточными напряжениями в приповерхностном слое тонкостенных деталей, а также деталей с регламентированной

упругостью (мембран, поршневых колец, пружин и др.) представляет практический интерес с точки зрения производства и последующей обработки.

Введение в МЭП веществ позволяет стабилизировать процесс, улучшить качество ЛС. Так в работе А.Д. Верхотурова [86] было отмечено увеличение переноса материала на упрочняемое изделие после намазывания графитом поверхностей подвергаемых ЭИЛ. Для увеличения толщины ЛС в работе Н.Г. Мещерякова [46] предложено предварительно наносить мягкие поверхностно-активные металлы Sn , Zn , после чего выполнять ЭИЛ.

С целью снижения шероховатости поверхности, дополнительного упрочнения поверхностного слоя, а также повышения его несущей способности, усталостной прочности выполняется выглаживание ЛС после обработки. Поверхностно-пластическое деформирование может выполняться как до, так и после ЭИЛ. При выглаживании перед легированием достигается деформационное упрочнение подложки для повышения несущей способности формируемого слоя [6].

Для повышения твердости и плотности легированных покрытий применяется их последующее ультразвуковое упрочнение [151].

Исследования в области концентрированных источников энергии проводились в работе О.В. Паустовского и др. [115]. Авторы показали, что последующее воздействие концентрированного солнечного излучения на электроискровые покрытия, полученные легированием электродом из материала $ZrN-(Cr, Ni, Al_2O_3)$ по углеродистой стали (У8) приводят к снижению интенсивности износа и уменьшению коэффициента трения. При снижении интенсивности облучения с 785 °С до 530 °С и сокращения времени обработки с 25,3 сек до 8,6 сек наблюдалось улучшение трибологических характеристик при снижении скорости испытаний на скольжение с 10 до 5 м/с. Излучение приводит к изменению фазового состава покрытий. До обработки излучением основная фаза в покрытии ZrO_2 (кубический), после $ZrNi$ с присутствием ZrO_2 (тетрагональный). После обработки излучением покрытия происходит закалка с образованием мартенсита и троостита в поверхностном слое.

Для уменьшения микротрещин в ЛС в работе [119] предложено использовать последующую лазерную обработку поверхностного слоя. Защитное покрытие $TiC-Ni$ полученное методом ЭИЛ на медных электродах сварочных аппаратов подвергалось последующему облучению полупроводниковым лазером мощностью 4 кВт при скорости обработки 80 мм/мин в защитном газе Ar . Авторы отмечают снижение пористости покрытия, а также взаимодействие легирующего материала с материалом подложки (Cu). Полученное покрытие снизило факторы проявления точечной коррозии (питтинг) рабочей поверхности и повысило срок службы электродов.

Обширные данные в области металлургической составляющей процесса ЭИЛ позволяют отслеживать структурные и фазовые состояния ЛС. Получать сложные сплавы аморфного типа, ЛС с карбидным, нитридным, боридным, силицидным, оксидным включениями, со сложной микроструктурой или наличием интерметаллидных соединений [121]. Применение в качестве электрода материалов из спеченных порошков позволяет получать ЛС в виде пластичной матрицы, с низкой температурой хладоломкости. Приповерхностный материал может обладать низким коэффициентом термического расширения близким к подложке и содержать мелкие включения в виде твердой фазы (интерметаллиды, карбиды, бориды и др.) [92, 97, 106]. Подобные соединения позволяют обеспечить высокую твердость и износостойкость покрытия. Наличие пластичной матрицы позволяет обеспечить высокие антифрикционные характеристики.

Автором работы [82] была изучена кинетика формирования электроискровых покрытий при использовании электродных материалов на основе сплава $TiC-Cr_3C_2-Ni$ с модифицированной структурой на никелевом сплаве марки ЭК-61. Введение в электродный материал наноконцентра привело к увеличению эрозии анода, что связано с мелкозернистой структурой и присутствием наночастиц на границах раздела зерен. Вместе с тем, из приведенных зависимостей видно, что добавки нанодисперсных порошков также способствуют росту привеса на катоде, по сравнению с покрытиями, нанесенными базовым электродным материалом без добавок. Наибольший привес на катоде отмечен в случае применения электродов с модифицирующими добавками W и $WC-Co$. Введение нанодисперсного компонента в состав электродного материала способствовало увеличению количества рабочих импульсов, что связано с повышенной эрозионной способностью модифицированного электродного материала. Также введение в электродный материал и в состав покрытия наноконцентра способствовало снижению скорости окисления электроискровых покрытий. Наибольшую жаростойкость имели покрытия, нанесенные электродными материалами с добавками вольфрамсодержащих нанопорошков. Добавка нанодисперсного порошка ZrO_2 , полученного по технологии золь-гель синтеза, способствовало уменьшению скорости окисления по сравнению с покрытием, содержащим более крупнозернистую добавку ZrO_2 с размером частиц менее 20 мкм.

В работе [131] авторы показали, что высокая пористость снижает теплопроводность электрода при ЭИЛ. В зоне разрядов электрод сильнее нагревается, что повышает эрозию и соответственно осаждение материала электрода на легируемую поверхность. Оптимальная пористость стеллитоподобных сплавов для наплавки без использования защитной среды (инертных газов) 10% и в защитной среде (Ar) до 20%.

Такая же проблема изучалась автором [42]. Для повышения эрозионной способности электрода и увеличения эффективности процесса ЭИЛ требуются электродные материалы с более низкой теплопроводностью и повышенной резистивностью. Последнее может быть достигнуто наличием в электроде некоторой остаточной пористости, уменьшением размера зерна карбидной фазы, увеличением объемной доли межфазных границ и плотности линейных и точечных дефектов структуры. Наноструктурированные электроды состава $WC - 8\%Co$ обеспечивают повышенные эрозионную способность и скорость осаждения электроискровых покрытий. Вследствие высокой эрозионной способности наноструктурированных электродных материалов их массоперенос, а также фазо- и структурообразование покрытий протекают при небольшом проплавлении подложки и преимущественном переносе твердых карбидных зерен. Для традиционного сплава ВК8 объем проплавленного в канале разряда металла подложки, приходящегося на единицу массы WC , существенно выше, что приводит к формированию покрытий с низким содержанием карбидных фаз и с преимущественным содержанием твердых растворов на основе железа или никеля или титана. Образование на торце вторичной структуры (продуктов взаимодействия электрода и подложки в результате обратного массопереноса) является лимитирующим фактором процесса формирования покрытий.

На основе серии экспериментальных данных по массопереносу материала электрода на подложку авторы [122] обозначили причины, ухудшающие качественные характеристики данного процесса. При выравнивании химического состава подложки с составом электрода в процессе легирования дальнейшее осаждение материала прекращается в силу возникающих конкурирующих явлений. Для получения более толстых покрытий необходимо использовать импульсы с большей энергией. Однако одной из причин, ограничивающих толщину покрытий, является конкурирующее разрушение предыдущего слоя во время многократного легирования электродом заданного участка поверхности. Сделан вывод, что для получения качественных покрытий необходимо применять оптимальные режимы установки с автоматизированным отслеживанием данных параметров (следающей системой межэлектродного зазора).

В рассмотренных выше работах делается попытка сформулировать не только причинно-следственные связи рассматриваемых явлений, но и попытаться прогнозировать и влиять на характер и свойства происходящих процессов.

1.5. Математические модели и теоретические исследования, направленные на оптимизацию и совершенствование электроискровых процессов

Состояние рабочих режимов процесса непосредственно влияет на характер протекающих физико-химических явлений при ЭИЛ. Для получения качественного покрытия при высокопроизводительной обработке необходим подбор оптимальных параметрических

составляющих используемого оборудования. Непосредственная оценка и основные зависимости таких показателей сформулированы на основе теоретических исследований электроэрозионного процесса.

Более детальное изучение влияния энергетических режимов обработки на интенсивность и качество получаемого ЛС, состояние структуры и свойств приповерхностных слоев, сплошность покрытия затрагивается в работах аналитического плана. Задачи исследований в таких работах направлены на математическое описание зависимостей, моделирование условий, а также отслеживание корреляции и взаимодействия различных факторов, непосредственно влияющих на характер обработки.

Наиболее полные исследования в основном описывают влияние состава и теплофизических свойств материалов электродов, энергетические характеристики процесса на концентрационное соотношение элементов по глубине в формируемом ЛС и получаемые при этом его физико-химические характеристики структуры и поверхности.

Основные положения таких работ можно проследить в [51, 20]. Весьма обширный анализ кинетики процесса ЭИЛ приведен как с учетом обобщенных физических моделей ЭИЛ, так и экспериментальных данных. Авторами проведен анализ различных источников по имеющимся публикациям, дополнен собственными теориями и заключениями.

В работах Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко [57, 58, 54] предположили, что при импульсных разрядах электротермические процессы являются основой электрической эрозии. После пробоя МЭП с катода испускается сфокусированный пучок электронов и, взаимодействуя с поверхностным слоем анода, передает ему выделяющуюся энергию торможения. Локальность воздействия приводит к направленному взрыву участка анода, воспринявшего этот импульс. В результате расплавленный и размягченный металл выбрасывается из подвергшейся воздействию импульса области. Выброс металла происходит не только в результате тепловых процессов, но и под влиянием электродинамических сил. В результате при разряде в газовой среде часть выброшенного в межэлектродное пространство металла достигает противоположного электрода и прочно соединяется с его поверхностью.

Исследуя процесс электрической эрозии, автор Б.Н. Золотых [44, 45] считает, что после формирования канала разряда процесс передачи энергии разряда электродам осуществляется за счет бомбардировки заряженными частицами – электронами анода и ионами катода; термической газокINETической бомбардировки частицами, составляющими канал разряда; торможения факелов паров, поступающих на анод с противоположных электродов; теплового излучения; действия объемного источника тепла. В тонком поверхностном слое электродов происходит торможение электронов и ионов и переход кинетической энергии в тепло. Следовательно, на электродах возникают кратковременные сосредоточенные плоские

источники тепла ограниченных размеров. Нестационарный процесс распространения тепла от этих источников вызывает плавление и испарение локальных зон материала. Анализ тепловых процессов на электродах при электроискровой обработки позволил установить количественные связи величин энергии, выделяющейся на электродах, и длительности разряда с размерами лунки и предложить метод расчета производительности и шероховатости электроискрового процесса.

Миграционной теории электрической эрозии металлов придерживались авторы И.Г. Некрашевич и И.А. Бакуто. В соответствии с теорией полный ток разряда в каждый момент времени протекает не через всю зону электрода, взаимодействующего с плазмой разряда, а лишь через небольшие тонкие разрядные каналы, непрерывно мигрирующие в зоне разряда. В точке контакта канала с электродом проходит ток большой плотности (10^7-10^8 А/см²), вызывающий нагрев и взрыв материала электрода. Основную роль в нагреве материала электродов может играть как объемный, так и плоский источник тепла. После взрыва канал разряда перемещается на новое место. Элементарные акты эрозии на катоде и аноде могут проходить не одновременно, так как необходимое время прогрева зоны контакта на электродах может оказаться различным. Различия характера электронно-ионных процессов на аноде и катоде приводят к различной ширине канала в зонах контакта с электродами, следовательно, к разной плотности тока в этих зонах. Полный результат от одного импульсного разряда является суммарным результатом многократно повторяющихся элементарных актов эрозии, осуществляемых мигрирующим каналом разряда [20].

Обобщенная модель процесса ЭИЛ А.Д. Верхотурова отличается от модели Лазаренко кинетикой процесса и учетом поверхностных явлений на аноде и катоде. В частности, учитывались явления: разрушения электродов в жидкой, паровой и твердой фазах; схватывание их в момент контакта; изменение свойств рабочих поверхностей за счет переноса материала и импульсных нагрузок; наличие на катоде в зоне действия искры микрованны, обеспечивающей перекристаллизацию материалов и их физико-химическое взаимодействие; ограничение толщины слоя за счет внутренних напряжений и термоусталости; дискретный характер формирования ЛС. Искровой разряд оказывает на металл импульсное тепловое и механическое воздействия [51].

Ряд феноменологических моделей посвящен определению математических зависимостей, характеристик и коэффициентов энергетических параметров, улучшающих процесс ЭИЛ.

Автор работы [63] приводит результаты исследований величины приведенной энергии, частоты и длительности следования искровых разрядов в зависимости от суммарного привеса катода, позволяющие рассчитать толщину покрытия, а также их влияние на микроструктуру,

шероховатость и эксплуатационные характеристики покрытия. В работе рассматривается энергетический параметр процесса, предельные значения которого характеризуют достижение границы хрупкого разрушения и начало усталостного разрушения покрытия, уменьшения микротвердости вследствие накопления дефектов. Расчёт по таким параметрам позволяет обеспечить качественное формирование ЛС при необходимых режимах обработки.

В работе [6] автором проведен комплексный анализ и даны рекомендации, позволяющие повысить качество и эффективность процесса легирования. Так по экспериментальным данным эрозионной стойкости и условиям выброса эродированного материала из зоны взаимодействия разрядов, строятся математические зависимости состава и толщины ЛС с учетом энергий поступающих на сопряженные электроды. Делается вывод, что на состав ЛС и его толщину значительное влияние оказывают выброс материала из зоны взаимодействия электродов, соотношения коэффициентов эрозии и энергий, поступающих на сопряженные электроды. На основе получаемых данных, зависимостей и характере поведения различных составляющих процесса обеспечивается необходимая эффективность легирования и состав упрочненного слоя.

Часть аналитических работ посвящена исследованию обеспечения устойчивости рабочих процессов и качества обрабатываемой поверхности на основе подходов искусственного интеллекта [91]. Так автором установлены закономерности параметров единичного электроэрозионного разрушения с производительностью и качеством поверхности при ЭЭО. Показано, что распределение диаметров единичных лунок происходит по закону равной вероятности, вследствие чего при ЭЭО имеет место систематическая погрешность, связанная с самим процессом (непостоянство сопротивления по площади электрода). Повышение устойчивости ЭЭО возможно на основе представлений о диссипативном канале. Время активного взаимодействия материала с электрическим разрядом в среднем на порядок, а то и два порядка меньше периода формирования активного диссипативного теплового стока. На основе разработанных критериев устойчивости ЭЭО предложена система адаптивного управления технологическими параметрами процесса ЭЭО. Система, способствующая повышению качества обработанной поверхности, а также уменьшению износа ЭИ и увеличению производительности, основана на определении оптимальных режимов работы оборудования, обеспечивающих повышение устойчивости ЭЭО.

Анализ основных моделей и теоретико-экспериментальных данных позволил выделить следующие направления исследований массопереноса взаимодействующих материалов электродов, а также взаимосвязи состава и свойства электрода и энергетических параметров процесса, наименее изученных в аналитическом плане.

1.6. Постановка цели и задач исследований

Основываясь на проведенном анализе научно-технических публикаций зарубежных и российских авторов, патентов и авторских свидетельств, сделаны следующие выводы, выбраны направления исследований в данной работе.

Электрофизические процессы обработки, упрочнения и восстановления поверхностей различной номенклатуры изделий, а также физико-химическое модифицирование приповерхностных слоев деталей и узлов находят наиболее широкое применение благодаря многообразию схем и простоте внедрения технологии.

Электрическая энергия не преобразуется в силовые, механические виды энергии, а непосредственно реализуется в зоне обработки в виде локальных высококонцентрированных источников (электроискровой разряд). При взаимодействии инструмента с заготовкой практически исключены факторы силового воздействия, при этом возможна обработка жаростойких и жаропрочных сплавов, твердосплавных материалов, керамики. Получение инструмента не сопряжено с большими производственными и технологическими затратами. Существуют широкие возможности в выборе состава и свойств материала электрода, а также формы и технологических схем производства.

Простота автоматизации, технологическая надежность, локальность применения непосредственно снижают время и упрощают процесс формообразования или восстановления сложных поверхностей, сокращают время подготовки и реализации в условиях мелкосерийного и индивидуального производства или ремонта.

Однако эффективность применения электроискровых методов, сдерживается недостаточностью данных непосредственно влияющих на физические характеристики, интенсивность процессов и явлений, позволяющих повышать производительность обработки. Применять современные материалы и сплавы на их основе для различных задач, непосредственно воздействовать на характер и условия формирующихся покрытий и модифицируемых слоев, позволяющих также расширить области реализации данного метода и номенклатуру обрабатываемых изделий.

Отрицательными сторонами ЭИЛ являются низкая производительность процесса с определенными предельными значениями по качественным и количественным показателям, характеризующим толщину покрытия, состав и структуру материала по глубине модифицированного слоя. Неудовлетворительные значения шероховатости поверхности образуемых покрытий, формирующиеся остаточные напряжения в поверхностных слоях, а также низкие показатели усталостной прочности.

Рассмотрев состояние научно экспериментальной составляющей технологии электроискровых процессов можно выявить недостаточную информативность, как в теоретической, так и практической области исследований. В частности моделирования, расчета и управления составом и структурой образуемых ЛС, многослойного и многокомпонентного легирования, получения различных защитных, модифицированных покрытий.

1.7. Выводы

В результате проведенного обзора научно-технических публикаций по методам нанесения защитных и упрочняющих покрытий, а также способам повышения работоспособности поверхностных слоев и восстановления рабочих поверхностей деталей можно сделать следующие выводы:

– материалы, применяемые при производстве номенклатуры изделий ГТД, имеют широкое разнообразие. Узлы и агрегаты, производимые из данных материалов, подвержены износу и повреждениям, на величину и характер которых оказывает влияние большое количество факторов;

– представленные в обзоре способы повышения износостойкости деталей, а также методы восстановления и ремонта поврежденных элементов ГТД имеют существенные недостатки: сравнительно низкую адгезию к упрочняемой или восстанавливаемой поверхности; усложнение или добавление подготовительных операций при локальном нанесении покрытия или локального восстановления поврежденного участка; значительные габариты применяемого оборудования и технологической оснастки; ограниченные возможности или полное отсутствие таких при необходимости сформировать покрытие на сложноступных поверхностях, в полужамкнутых полостях и т.д.; присутствие при нанесении покрытий высоких температурных градиентов в самом покрытии, а также тепловых полей на значительном углублении от обрабатываемой поверхности в тело детали и, как следствие, неизбежное значительное тепловое вложение в заготовку и т.д.;

– электроискровые методы повышения работоспособности поверхностных слоев и восстановления рабочих поверхностей деталей лишены вышеизложенных недостатков, однако обладают своими собственными отрицательными сторонами, среди которых: возникновение в ЛС и приповерхностных слоях детали после ЭИЛ растягивающих напряжений; определенные предельные значения по толщине получаемых покрытий или восстанавливаемых локальных участков; достаточно сложный и мало изученный процесс контроля состава и свойств получаемых слоев материала;

– необходимо учитывать многофакторные составляющие для условий оптимального протекания электроискровых процессов, при которых образуются сплошные, равномерные, толстые, с низким значением шероховатости слои.

Из вышеизложенного следует, что электроискровые процессы формирования защитных и упрочняющих покрытий, нанесения слоев материалов, обеспечивающих восстановление изношенных поверхностей деталей, недостаточно изучены. Необходимы дальнейшие разработки в области:

- теоретических исследований механизмов электрической эрозии и массопереноса материала, формирования ЛС, влияние на него технологических режимов обработки;
- металлофизических и физико-химических исследований структуры, состава и свойств формируемых слоёв, создание для эти целей новых легирующих материалов и технологии их получения;
- совершенствования имеющихся технологических процессов ЭИЛ, комбинирования с перспективными технологиями упрочнения и модифицирования поверхности.

1.8. Цели и задачи исследований

Целью диссертационной работы является исследование процесса ЭИЛ, и создание на его основе новых высокоэффективных технологий комбинированного упрочнения, обеспечивающего повышение надежности, ресурса и работоспособности деталей и узлов авиационных двигателей

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе определены следующие задачи исследований:

- анализ состояния научной и практической составляющих технологии ЭИЛ;
- разработка теоретической модели формирования упрочненного ЛС требуемого состава, толщины, высокой равномерности и сплошности;
- разработка методики расчета и прогнозирования методом конечных элементов остаточных напряжений в поверхностном слое после ЭИЛ, и путей снижения остаточных напряжений в поверхностном слое для тонкостенных элементов;
- разработка технологии карбооксидирования рабочих поверхностей цилиндров, и рекомендаций по технологии комбинированного упрочнения, включающего ЛКО и последующее алмазное выглаживание;
- предложение методики проведения испытаний и оценки служебных свойств упрочненных поверхностей;
- проектирование оборудования и оснастки для выполнения ЛКО и алмазного выглаживания на серийных образцах изделий;

– разработка комплекта управляющих программ для систем с ЧПУ, позволяющих реализовать возможности комбинированного упрочнения типовых деталей и поверхностей.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Материалы и изделия для исследований

Исследования производились на образцах из материалов применяемых в производстве авиационной техники: стали 30ХГСА; титановые сплавы ВТ20; сплавы на никелевой основе (ЭИ867) ХН62МВКЮ, (ЭП866) 15Х16К5Н2МВФАБ, (ЭИ868) ХН60ВТ, (ЭИ961) 13Х11Н2В2МФ, сплав СДП2 (Ni-основа; 20%Cr; 12%Al; 0,5%Y); технически чистые металлы: медь (МЗр), молибден (МЧВП), вольфрам (ВВ2); металлокерамические твердые сплавы ВК6М, Т15К6.

Исследования производились на серийных комплектах изделий:

- ГЦ системы управления критическим сечением реактивного сопла;
- ГЦ системы управления поворотным устройством реактивного сопла;
- ГЦ поворотного входного НА КНД;
- ГЦ поворотного НА КВД.

Подготовка поверхностей образцов под легирование производилась в зависимости от цели исследований точением, шлифованием или полированием.

Часть методик представлена в соответствующих главах.

2.2. Технологическое оборудование электроискрового упрочнения и легирования

Исследования по ЭИЛ и ЛКО, выполнялись на модернизированной установке ELFA731. Установка оснащена независимым генератором ГТ-1Б, вырабатывающим импульсы постоянной полярности прямоугольной формы. Генератор обладает следующими характеристиками:

- ток короткого замыкания I_k ($I_k = 6,4; 8,0; 9,6; 11,2; 12,8; 14,4; 16,0$ А);
- напряжение холостого импульса $U_0 = 90,0$ В;
- скважность q ($q = 5,0; 10,0$);
- длительность импульса t_{on} ($t_{on} = 3,0; 5,0; 8,0; 12,0; 20,0$ мкс);
- емкость разрядного конденсатора, подключаемого параллельно межэлектродному зазору С ($C = 0,1; 0,22; 0,47; 0,68; 1,0$ мкФ).

При таких параметрах t_{on} и q значения частоты импульсов, вырабатываемых генератором, составляют $f = 5,0 \dots 66,0$ кГц.

Установка предназначена для легирования рабочих поверхностей деталей и режущего инструмента методом ЭИЛ.

Схема процесса легирования представлена на рисунке 2.1. ЛЭ 1 является анодом, а упрочняемое изделие 2, устанавливаемое на рабочем столе 3 – катодом.

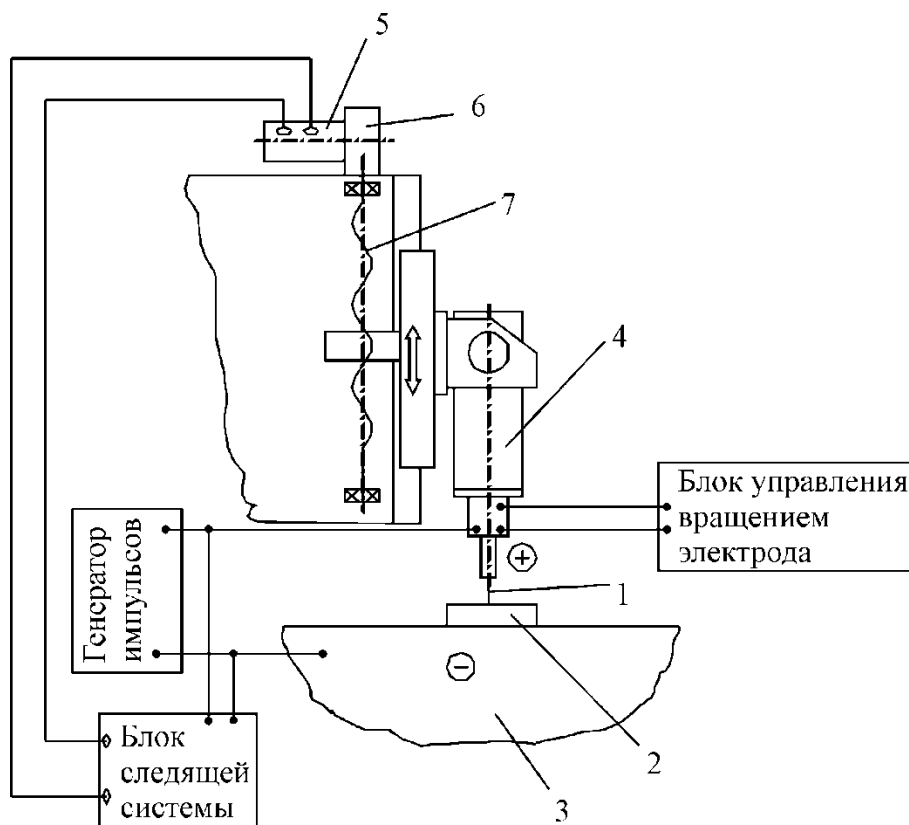


Рисунок 2.1 – Схема процесса ЭИЛ: 1– ЛЭ; 2 – упрочняемое изделие; 3 – стол; 4 – наносящая головка; 5 – электродвигатель следящей системы; 6 – редуктор; 7 – ходовой винт

Параметры электроискровых разрядов подбирается таким образом, чтобы происходило преимущественная эрозия ЛЭ. Необходимая мощность, частота и длительность разрядов обеспечиваются генератором импульсов, подающим на ЛЭ импульсы напряжения прямоугольной формы [30].

Требуемая величина межэлектродного зазора поддерживается электромеханической следящей системой, перемещением следящей головки 4 в вертикальном направлении посредством исполнительного электродвигателя 5, червячного редуктора 6 и ходового винта 7. Управление двигателем 5 осуществляется блоком следящей системы.

С целью повышения сплошности электроискровых покрытий и равномерности эрозии ЛЭ, ему придаётся вращение от электродвигателя 6 с частотой $V_{30} = 400 \dots 4000$ об/мин, регулируемой блоком управления вращением ЛЭ.

ЛЭ диаметром от 0,2 до 5 мм устанавливается в цанговом или трехкулачковом патроне.

Значения режимов установки подбираются опытным путём в зависимости от требований, предъявляемых к покрытию, материалов ЛЭ и легируемой поверхности. От назначения режимов обработки зависит шероховатость поверхности (может изменяться в пределах $Ra = 0,8 \dots 2,5$ мкм), толщина покрытия (от нескольких микрон до 100 мкм и более), его

сплошность, элементный состав, твёрдость. Производительность определяется скоростью перемещения ЛЭ относительно обрабатываемой поверхности.

Установка обеспечивает перемещение ЛЭ по координатам X, Y, Z (рис. 2.2).

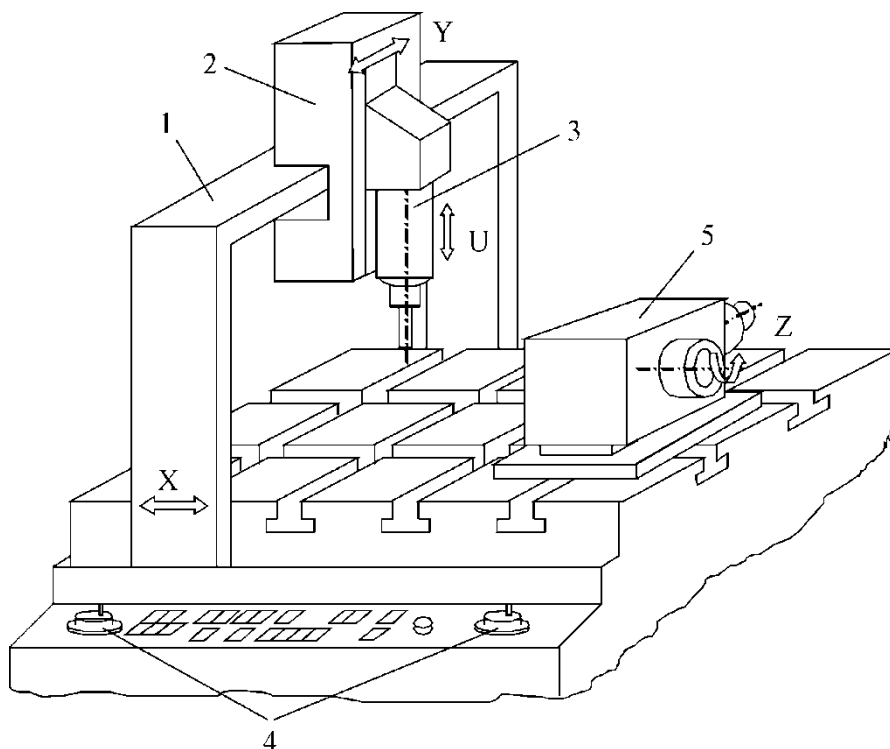


Рисунок 2.2 – Рабочая зона установки ELFA731: 1 – портал; 2 – суппорт; 3 – наносящая головка; 4 – импульсные генераторы; 5 – поворотная ось (координата вращения Z)

Перемещение ЛЭ по оси X обеспечивается порталом 1, а по Y – суппортом 2. Приводы портала и суппорта включает серводвигатели и винтовые передачи. Управление этими приводами осуществляется устройством с ЧПУ или вручную, с помощью специальных импульсных генераторов 4 или кнопок.

На суппорте 2 расположена наносящая головка 3, перемещение которой задаётся следящей системой (координата U), что позволяет не только поддерживать величину межэлектродного зазора, но и производить обработку сложных фасонных поверхностей.

Третья управляемая координата Z, используется при обработке изделий в виде тел вращения (цилиндрические, конические, фасонные детали, свёрла, зенкеры, развёртки, фрезы и прочее) для сообщения им вращательного движения. Для этих целей установка имеет специальное съёмное приспособление 5, в котором устанавливается упрочняемое изделие. Управление координатой Z подобно X и Y может осуществляться от системы ЧПУ или вручную, посредством импульсных генераторов и кнопок.

Установка оснащена системой ЧПУ класса CNC "Fanuc-3M". Данное устройство ЧПУ ориентировано на ручной ввод УП в режиме диалога с использованием алфавитно-цифрового

дисплея. Благодаря этому можно готовить УП непосредственно у станка, на основе данных чертежа.

По технологическому признаку – это позиционно-контурная система, с достаточно обширной (4000 знаков) полупроводниковой энергозависимой памятью управляющих программ, позволяющей содержать несколько программ или подпрограмм обработки деталей.

Устройство ЧПУ построено на базе 3-х микропроцессорных модулей. Микропроцессорный модуль представляет собой функционально законченное и конструктивно оформленное на одной плате изделие, состоящее из микропроцессора и других вспомогательных микросхем.

2.3. Методика, приборы и установки для испытания и оценки свойств упрочненных поверхностей

Шероховатость поверхностей после технологических операций обработки, а также упрочнения, измерялась на следующем оборудовании:

- профилографе-профилометре мод.252;
- прибор для измерения шероховатости поверхностей "Surftest SJ-210";
- прибор для измерения шероховатости поверхностей "TR200".

Микротвердость измерялась по ГОСТ 945076 на приборах:

- микротвердомер ПМТ-3;
- микротвердомер с цифровым дисплеем "HVS-1000".

Масса образцов измерялась на аналитических весах ВЛА-200г-М.

Металлографический анализ выполнялся на микроскопе ММР-2Р.

Топография поверхностей после упрочнения изучалась с помощью микроскопа ММР-2Р, оснащенного цифровой камерой «EVS USB Camera», а также микротвердомера ПМТ-3, оснащенного цифровой камерой «EVS USB Camera» с увеличением x15.

Для получения цифровых фотоизображений применялся микроскоп ММР-2Р, оснащенный цифровой камерой «EVS USB Camera» с увеличением x15.

Статистическая обработка результатов исследований производилась с использованием математического обеспечения ЭВМ.

Для оценки состояния получаемых покрытий и определения несущей способности применялись следующие методы исследований и испытаний.

2.3.2. Определение антифрикционных свойств и износостойкости покрытий

Для экспресс-оценки износостойкости использовалась малогабаритная установка, осуществляющая изнашивание испытываемой поверхности сферическим индентором при его

возвратно-поступательном движении [105]. Схема установки приведена на рисунке 2.3, а ее внешний вид на рисунке 2.4.

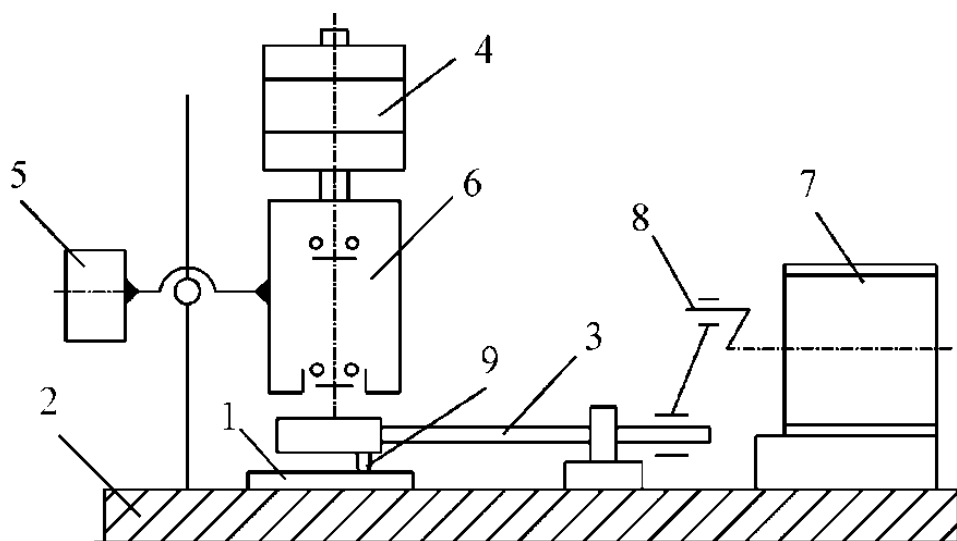


Рисунок 2.3 – Схема прибора для экспресс-оценки сопротивления изнашиванию и изнашивающей способности. 1 – стол; 2 – плита; 3 – штанга; 4 – грузы; 5 – противовес; 6 – нагружающий узел; 7 – электродвигатель с редуктором; 8 – кривошипно-шатунный механизм; 9 – индентор

Испытываемый образец устанавливался на столе 1, в котором находился нагревательный элемент для проведения исследований при повышенных температурах (до 500°C), и закрепляется прижимом (на схеме не показан). Величина нормальной нагрузки на сферический индентор задается грузами 4. Вес нагружающего узла предварительно уравнивается противовесом 5. Возвратно-поступательное движение обеспечивается электродвигателем 7 через кривошипно-шатунный механизм 8 и штангу 3. Сферический индентор движется по дуге. Число циклов изнашивания фиксируется счетчиком циклов. Узлы прибора монтируются на плите 2.

Изнашивание испытываемой поверхности производится алмазным сферическим индентором. Выбор для этих целей алмаза обусловлен его малой изнашиваемостью. Оценка величины износа производят по ширине канавки, образующейся в результате изнашивания. Экспериментально установлено, что за первые 10–50 циклов скольжения индентора происходит пластическое передеформирование с образованием канавки приработки шириной b_n . Последующее увеличение ширины канавки вызвано износом материала. При отсутствии схватывания алмаза с испытываемой поверхностью, которое имеет место только при испытании образцов из титановых сплавов и материалов аналогов титана, изнашивание носит усталостный характер.

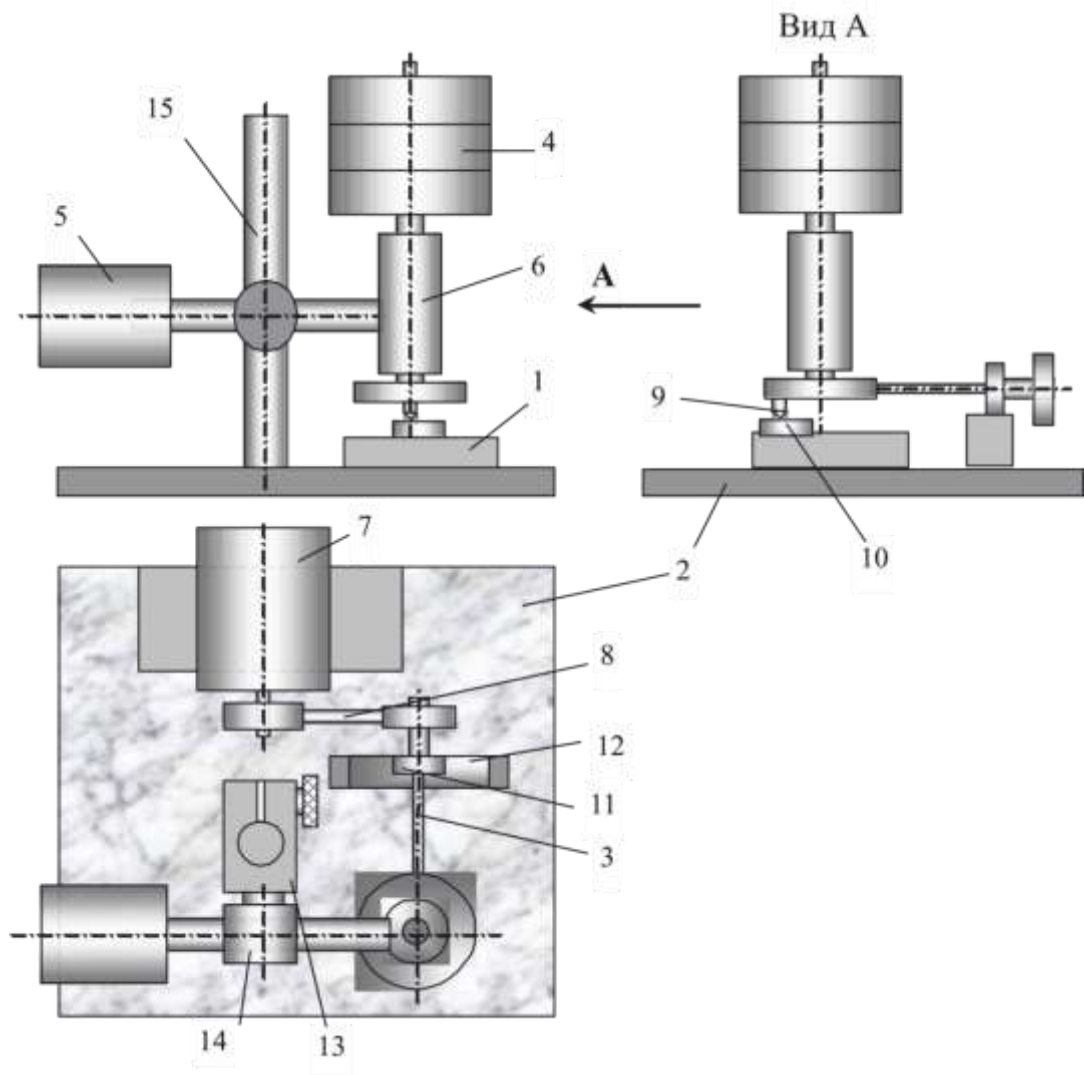


Рисунок 2.4 – Схема прибора для экспресс-оценки сопротивления изнашиванию и изнашивающей способности. 1 – стол; 2 – плита; 3 – штанга; 4 – грузы; 5 – противовес; 6 – нагружающий узел; 7 – электродвигатель с редуктором; 8 – кривошипно-шатунный механизм; 9 – индентор; 10 – испытываемый образец; 11 – подшипник; 12 – направляющая; 13 – кронштейн; 14 – шарнир; 15 – стойка

В качестве критерия оценки несущей способности поверхностного слоя использовалась удельная характеристика w :

$$w = \frac{V_u}{P_n L},$$

где P_n – погонная нагрузка; V_u – объем изношенного материала; L – путь трения.

$$P_n = \frac{2P}{b_k - b_n},$$

Здесь P_n – нормальная сила, действующая на индентор; b_n , b_k – ширина канавки после приработки и испытания соответственно.

$$L = 2l(N_k - N_n),$$

где N_H и N_K – число циклов скольжения алмаза до условной приработки и за время испытания соответственно; l – длина хода алмаза. Учитывая, что:

$$V_u = \frac{(b_K^2 - b_H^2)(b_K + b_H)l}{16R},$$

где R – радиус алмазного индентора, получаем выражение для расчета w :

$$w = \frac{(b_K^2 - b_H^2)(b_K + b_H)^2}{64P(N_K - N_H)R}.$$

Для определения величины w проводятся два последовательных испытания на разных участках поверхности с разным числом циклов скольжения алмазного индентора N_H и N_K . Затем производится измерение величин b_H и b_K . Последние измерялись на инструментальном микроскопе ММИ–2 с точностью до 0,01 мм.

Дополнительно проводились испытания при взаимодействии индентора с испытываемой поверхностью в среде ЦИАТИМ22.

Экспресс-оценка антифрикционных свойств упрочненных поверхностей выполнялась в условиях плоского кольцевого контакта на маятниковом трибометре, конструкция которого показана на рисунке 2.5.

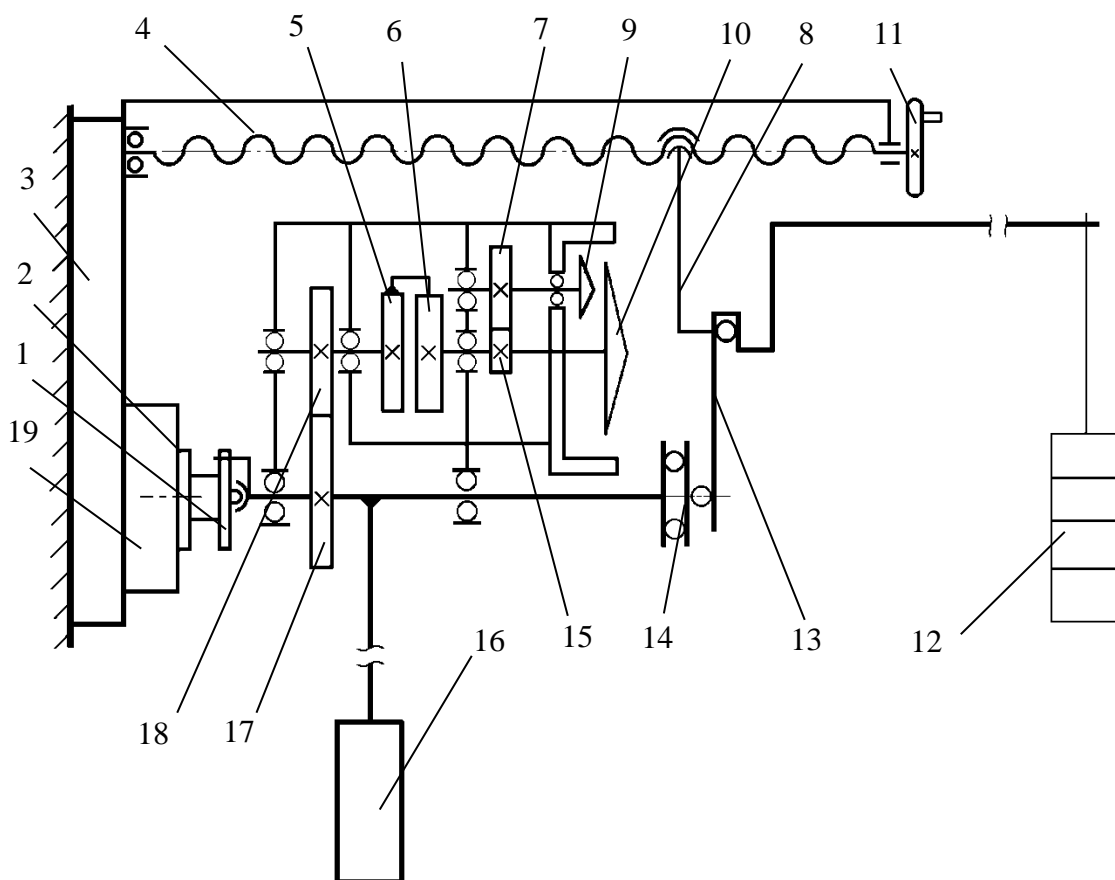


Рисунок 2.5 – Конструктивная схема установки для экспресс-оценки антифрикционных свойств

Прибор монтируется на плите 3 и содержит направляющие, по которым перемещается корпус. Внутри корпуса находится ось, совершающая возвратно-вращательное движение при колебаниях маятника 16. С одной стороны оси имеется муфта, обеспечивающая само установку рабочей поверхности контр образца 1 относительно образца 2, закрепляемого на столе 19. Нормальная нагрузка в испытываемом контакте создается грузами 12 через рычаг 13 и упорный подшипник 14. Для регулировки положения рычага 13 предусмотрено смещение его оси перемещением кронштейна 8, вращением ходового винта 4 посредством рукоятки 11.

Определение силы трения производится по величине ее работы, затрачиваемой на затухание колебаний маятника 16.

$$F_{mp} = \frac{W}{L} = \frac{MgL_{np}(\cos\beta - \cos\alpha)}{L}.$$

Здесь F_{mp} – сила трения; W – энергия отклоненного маятника; M – масса маятника; g – ускорение силы тяжести; L – путь трения; L_{np} – приведенная длина маятника; α , β – угол начального и конечного отклонений маятника соответственно.

Для определения пути трения используется измерительное устройство, работающее следующим образом. Возвратно-вращательное движение оси передается через зубчатые колеса 17 и 18 на храповой механизм 5, 6. Путь трения пропорционален показаниям стрелочных указателей 10 и 9. Движение на стрелочный указатель 9 передается через зубчатую пару 15–7, имеющую передаточное отношение 1/10. Измерительное устройство имеет две шкалы: большую (100 делений) и малую (10 делений). Один полный оборот стрелочного указателя 10 соответствует повороту стрелочного указателя 9 на одно деление.

В окончательном виде формула для расчета F_{mp} выглядит следующим образом:

$$F_{mp} = \frac{MgL_{np}(\cos\beta - \cos\alpha)25i}{\pi R_{np} \left(X_n + 5\frac{n}{6} \right)} - F_{nm},$$

где i – передаточное отношение кинематической цепи измерительного устройства; R_{np} – приведенный радиус кольца контакта:

$$R_{np} = \frac{d_n^3 - d_b^3}{3(d_n^2 - d_b^2)},$$

d_n , d_b – наружный и внутренний диаметры кольца контакта соответственно; X_n – показания в делениях стрелочных указателей измерительного устройства; n – число колебаний маятника; F_{nm} – условная сила трения, учитывающая потери энергии на трение в механизмах устройства. F_{nm} рассчитывается по этой же формуле на основе измерения без приложения нормальной нагрузки.

Величина β – определяется числом зубьев и диаметром храпового колеса. Для конкретной реализации прибора $\beta = 3,2^\circ$. Величина L_{np} определяется путем нахождения центра тяжести маятника.

Измерения на приборе производятся следующим образом. Устанавливаются образец и контр образец, задается требуемая нормальная нагрузка, маятник отклоняется от положения равновесия на угол α и фиксируется. Стрелочные указатели переводятся в нулевые положения, открывается фиксатор, и маятник начинает совершать затухающие колебания. После остановки маятника снимаются показания стрелочных указателей (X_n) и бесконтактного датчика числа колебаний (использовался прибор ТЭМП–4) и рассчитываются значения силы трения и коэффициента трения. Достоинством описанной конструкции является отсутствие датчиков и приборов для тензометрирования, требующих периодической юстировки и тарирования.

Величина нормальной силы может изменяться в широких пределах (10–500 Н). В столе установки размещен нагревательный элемент, позволяющий проводить измерения при повышенных температурах (до 500°C).

Выводы по главе 2

1. Представлены материалы и изделия, на которых производились исследования.
2. Рассмотрено технологическое оборудование для проведения экспериментов и контрольно-измерительное оборудование для исследования состояния покрытий.
3. Описаны методики для проведения оценки служебных свойств упрочненных поверхностей.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ И ЛЕГИРОВАНИЯ

3.1. Модель формирования ЛС при ЭИЛ

Возможность управлять процессом ЭИЛ, моделировать и прогнозировать процессы, протекающие во время его выполнения, является важным для обеспечения технологической надежности этого эффективного и перспективного метода упрочнения и восстановления деталей и инструмента. ЭИЛ можно рассматривать как сложный тепловой и физико-химический процесс, основанный на воздействии электрических разрядов на упрочняемую поверхность сопровождаемый переносом материалов между электродами, закалочных явлений, взаимодействием с окружающей средой [60]. Конечным этапом проходящих при ЭИЛ процессов является формирование ЛС, свойства которого зависят от плотности потока энергии и мощности электрических разрядов, свойств материала подложки и ЛЭ, характера выброса расплавленных и испаренных материалов, тепловых полей, фазовых превращений [73].

Описать эти взаимосвязанные процессы аналитически не представляется возможным по многим причинам, среди которых: сложные тепловые потоки между сопряженными электродами, нелинейное изменение теплофизических характеристик материалов при нагреве, распределение и распространение тепловых полей во времени, а также стохастический выброс материалов электродов в рабочую область канала и за его пределы газодинамическими и электродинамическими силами. По этой причине ЭИЛ при аналитическом описании приобретает многовариантность решений, и построения различных теорий и моделей [26].

На практике требуется получение качественного упрочненного поверхностного слоя с требуемыми значениями по толщине и составу, что крайне сложно достичь, используя для расчетов модель воздействий единичных разрядов. В этом случае важно учитывать закономерность распределения материала между электродами, его выброс и осаждение. Не маловажным является и кратность воздействия разрядов на поверхность детали (скорость перемещения электрода вдоль обрабатываемой детали) [49].

Исходя из изложенного, разработана феноменологическая модель, формирования ЛС, которая позволяет прогнозировать его элементный состав в зависимости от режимов обработки и физико-химических свойств материалов электродов.

Для построения модели были сделаны следующие допущения:

1. Количество выделяющейся энергии в канале разряда прямо пропорционально объемам эродируемого в процессе материала. Это относится как к материалам сопряженных электродов, так дополнительно вводимому в МЭП, в виде порошка или покрытия, материала:

$$Q_i = Z_i V_i,$$

где Q_i – количество энергии поступившей на $i^{\text{ый}}$ электрод;

V_i – объем материала эродированного с $i^{\text{того}}$ электрода;

Z_i – коэффициент, учитывающий сопротивление электрической эрозии материала элемента $i^{\text{того}}$ электрода.

Если расчет ведется с учетом только двух электродов – анода и катода считаем модель двухкомпонентной, если расчет идет с учетом дополнительно введенного в МЭП материала – модель считаем трехкомпонентной.

2. Расплавленный и испаренный с электрода материал распределяется во время импульса согласно следующей схеме: часть осаждается на сопряженном электроде, часть материала (выброшенного в МЭП и перемешавшегося с участвующими в процессе материалами) возвращается обратно, а часть выбрасывается из зоны разряда и не участвует в формировании ЛС:

$$V_{a,k,p} = xV_{a,k,p} + yV_{a,k} + zV_{a,k,p} \quad (3.1)$$

Следуя выражению (3.1), эродируемый материал с анода состоит из:

$$V_a = xV_a + yV_a + zV_a$$

Что правомерно и для катода. В трехкомпонентной модели третий элемент (упростив описание, применим термин «порошок») состоит из:

$$V_p = xV_p + zV_p,$$

где: xV_i – доля осаждаемого материала в объеме V_i ;

yV_i – доля вернувшегося на электрод материала в объеме V_i ;

zV_i – доля потеряннного материала в объеме V_i ;

$x + y + z = 1$ – долевые коэффициенты соответственно: «x» осажденного, «y» вернувшегося, «z» не участвующего в формировании покрытия материала.

В дальнейшем обозначения в скобках: (a, k, p) – соответственно анод, катод и порошок будут показывать наличие данного материала в ЛС на положительном или отрицательном электроде.

3. Полученный ЛС состоит из материалов элементов модели, при условии их равномерной концентрации в единице объема, причем сопротивление электрической эрозии, образовавшегося ЛС, пропорционально содержанию в нем взаимодействующих элементов модели и не изменяется по сравнению с исходными элементами.

4. Перенос материала между электродами во время разрядов рассматривается в три стадии:

– рассчитываются объемы материалов эродируемых с электродов согласно формуле (3.1);

– определяются объемы материалов элементов формирующих ЛС по формуле (3.1);

– определяются объемы материалов элементов, не подвергающиеся воздействию разряда импульса, т.е. окончательно сформировавшие ЛС. Рассчитываются объемы материалов эродируемых с электродов при последующем импульсе.

На первой стадии рассчитываются суммарные величины энергий исходя из выражения (3.1).

$$E_a = xQ_k + yQ_a + xQ_p \quad (3.2)$$

– суммарная величина энергии, затраченная на эрозию материалов элементов для формирования с помощью них ЛС на аноде при первом импульсе (т.е. на поверхности сформировался ЛС из элементов, для выброса которых суммарно было затрачено данное количество энергии);

$$E_k = xQ_a + yQ_k + xQ_p \quad (3.3)$$

– соответственно для катода.

На второй стадии объем и концентрационное соотношение осажденных материалов элементов (значения в скобках: a, k, p) на аноде (i принимает значение a) и катоде (i принимает значение k) подвергаются эрозии при втором, и далее n -ном импульсах. Материалы формируются с учетом количества выделяющейся энергии при разряде, а также величины и концентрационного соотношения ранее образовавшегося ЛС.

$$V_{i(a,k,p)n} = \frac{Q_i}{Z_{(a,k,p)}} \left(\frac{V_{i(a,k,p)(n-1)} Z_{(a,k,p)}}{V_{a(n-1)} Z_a + V_{k(n-1)} Z_k + V_{p(n-1)} Z_p} \right) \quad (3.4)$$

– если эродирует только материал, осажденный на предыдущем импульсе $V_{i(a,k,p)(n-1)}$
или

$$V_{i(a,k,p)n} = \frac{E_{a(n-1)}}{Z_{(a,k,p)}} \left(\frac{V_{i(a,k,p)(n-1)} Z_{(a,k,p)}}{V_{a(n-1)} Z_a + V_{k(n-1)} Z_k + V_{p(n-1)} Z_p} \right) + \Delta V_{in} \quad (3.5)$$

– если эродирует весь материал, осажденный на предыдущем импульсе, и часть исходного материала электрода ΔV_{in} , рассчитываемого по формуле:

$$\Delta V_{in} = \frac{Q_i - V_{i(a,k,p)(n-1)} Z_{(a,k,p)}}{Z_i};$$

На третьей стадии формируется второй импульс, с учетом ранее осажденного материала и количества энергии, затраченной на его формирование. На основе этих данных можно судить о количестве материала подвергающегося воздействию аналогично второй стадии. Используя значения по объемным величинам каждого элемента в ЛС из величин энергий, сформировавших ЛС на предыдущем импульсе – формулы (3.2) и (3.3), определяются новые объемы элементов в последующем формирующемся слое.

Определение суммарных величин энергий при отсутствии значений ΔV_{in} на второй стадии на основе результатов из формул (3.4) и (3.5):

$$E''_a = E'_a - \sum_i^{a,k,p} (xV_{a(i)}Z_{(i)} - zV_{a(i)}Z_{(i)} + xV_{k(i)}Z_{(i)}) + V_p \quad (3.6)$$

$$E''_k = E'_k - \sum_i^{a,k,p} (xV_{k(i)}Z_{(i)} - zV_{k(i)}Z_{(i)} + xV_{a(i)}Z_{(i)}) + V_p \quad (3.7)$$

Если рассчитывались значения ΔV_{in} на второй стадии:

$$E''_a = \sum_i^{a,k,p} (yV_{a(i)}Z_{(i)} + xV_{k(i)}Z_{(i)}) + V_p \quad (3.8)$$

$$E''_k = \sum_i^{a,k,p} (yV_{k(i)}Z_{(i)} + xV_{a(i)}Z_{(i)}) + V_p \quad (3.9)$$

В формулах выше E' и E'' соответственно величины энергий на предыдущем и последующем импульсах второй и третьей стадий.

Для расчета объемов элементов на положительном и отрицательном электродах на второй и третьей стадиях:

$$V'_{a(a,k)} = yV_{a(a,k)} + xV_{k(a,k)} \quad (3.10)$$

$$V'_{a(p)} = yV_{a(p)} + xV_{k(p)} + V_p \quad (3.11)$$

$$V'_{k(a,k)} = yV_{k(a,k)} + xV_{a(a,k)} \quad (3.12)$$

$$V'_{k(p)} = yV_{k(p)} + xV_{a(p)} + V_p \quad (3.13)$$

Аналогично определяются величины энергий для формирующихся ЛС на последующих импульсах.

Для более корректного описания явлений протекающих при ЭИЛ, модель позволяет учитывать перемещения электрода относительно рабочей поверхности. Основное отличие

заключается в условиях перераспределения объемов элементов модели при импульсах и изменяющихся величинах энергий E_i' идущих на формирование ЛС.

Так считаем, что перемещение электрода вдоль поверхности не оказывает напрямую влияния на концентрационное соотношение элементов в ЛС электрода, а соотношение элементов в смежной с электродом и подвергающейся легированию поверхности в конкретный импульс меняется согласно уравнению (3.6):

$$V_{a(a)m} = V_{a(a)} + (1 - M)V_{a(k)} + (1 - M)V_{a(p)} \quad (3.14)$$

$$V_{a(k,p)m} = MV_{a(k,p)} \quad (3.15)$$

где: M – коэффициент, учитывает скорость перемещения электрода ($M = 0$ означает, что электрод полностью сместится относительно предыдущего места разряда – второй импульс возникнет на не легированной поверхности детали, при $M = 0,5$ электрод сместится относительно предыдущего места разряда ровно наполовину).

Соответственно пересчитывается и величины энергий формирующие ЛС на данном импульсе с учетом изменившейся концентрации элементов.

Ниже представлен алгоритм расчета основных показателей модели (рис. 3.1).

Рассмотрим график распределения элементов в ЛС для долевых коэффициентов «х», «у», «z» со значениями (0,1; 0,9; 0; 0,1; 0,9; 0). Первые три значения – для анода, последующие три для катода, т.е. ($x_a; y_a; z_a; x_k; y_k; z_k$). Для компактности записи, указанные выше значения будем представлять следующим образом: $(\frac{0,1}{0,9}; \frac{0,1}{0,9})$.

$V_{i(a,k,p)(1f)}$ – объем материала, выделившийся с электрода в МЭП;

$V_{i(a,k,p)(2f)}$ – объем материала формирующий ЛС на электроде;

$V_{i(a,k,p)(3f)}$ – объем материала не подвергшийся воздействию разряда импульса.

(1,2,3) f – первая, вторая и третья стадии соответственно.

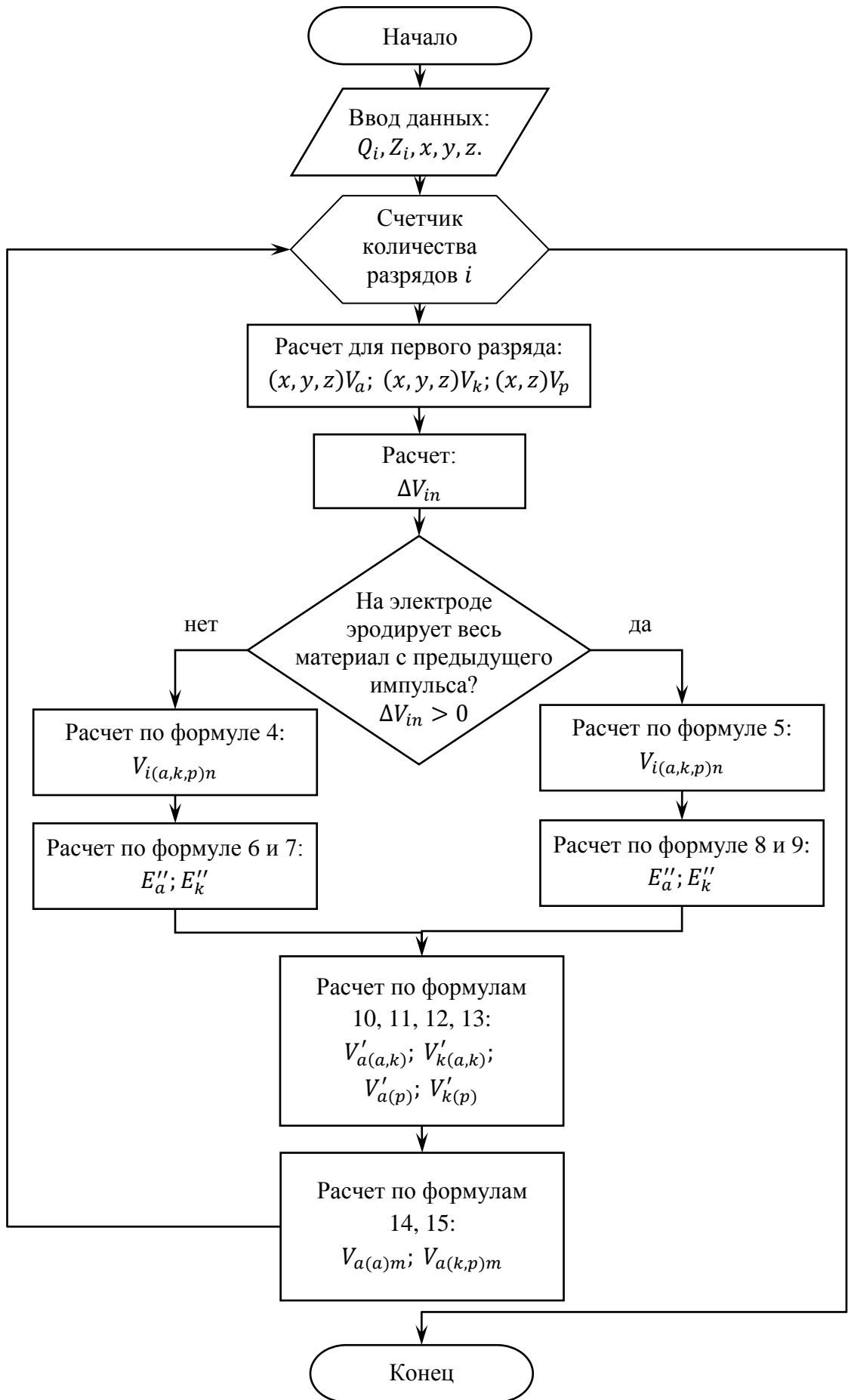


Рисунок 3.1 – Алгоритм модели переноса материалов и формирования ЛС

На рисунке 3.2 представлена зависимость распределения долей элементов C_i в объеме V_i ЛС для двухкомпонентной модели от номера импульса n . Кривые 1, 2, 5 – $V_{a(a)}$ и $V_{k(k)}$ соответственно на первой, второй и третьей стадиях. Кривые 4, 3, 5 – $V_{a(k)}$ и $V_{k(a)}$ соответственно на первой, второй и третьей стадиях.

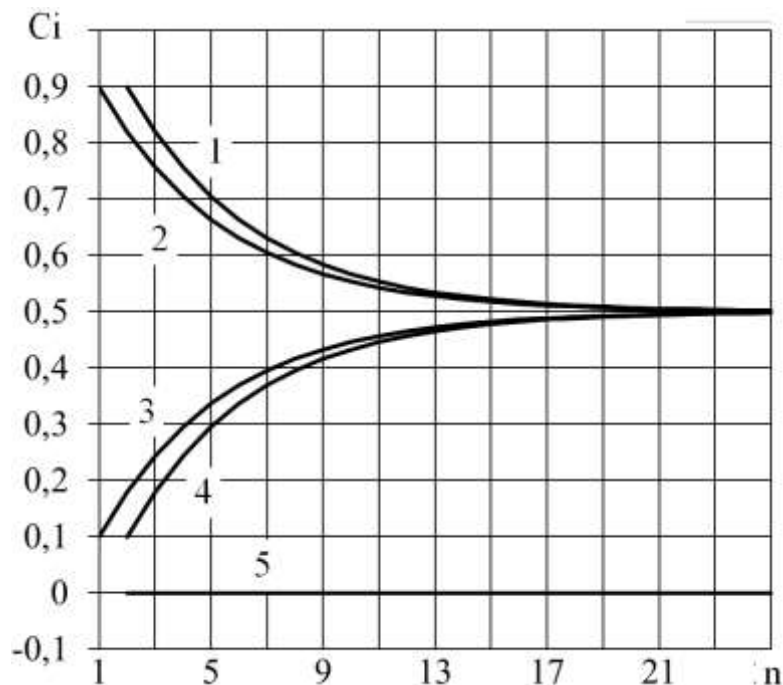


Рисунок 3.2 – Зависимость распределения долей элементов C_i в объеме V_i ЛС для двухкомпонентной модели от номера импульса n

Можно заключить, что при идеальных условиях (нет потерь материала с электродов) объемы элементов двухкомпонентной модели на обоих электродах выравниваются. С учетом одинаковых долевых коэффициентов для анода и катода, формирования окончательного слоя не происходит. $V_{i(a,k,p)(zf)} = 0$, величины энергий, формирующие ЛС, соответственно для анода и катода не изменяются $E'_a = E'_k = const$.

На рисунке 3.3, а, представлено распределение элементов двухкомпонентной модели в ЛС при коэффициенте выброса «z» равным 0,3. Содержание материала анода на электроде катоде при значениях коэффициентов «x» и «y» равным $(\frac{0,6}{0,1}; \frac{0,1}{0,6})$, $(\frac{0,5}{0,2}; \frac{0,2}{0,5})$ и $(\frac{0,4}{0,3}; \frac{0,3}{0,4})$ на второй ($V_{k(a)(2f)}$) и третьей ($V_{k(a)(3f)}$) стадиях соответственно для кривых: 1, 2, 3 и 4, 5, 6.

Отметим условие, при котором невозможно получить положительные объемы материалов элементов в третьей стадии. Если суммарная доля потерь переносимых на электрод элементов превышает долю окончательно формируемого ЛС в покрытии. Что видно на рисунке 3.3, б, кривая 2 ($V_{i(a,k,p)(zf)} > 0$), долевые коэффициенты равны $(\frac{0,4}{0,3}; \frac{0,3}{0,4})$ и $(\frac{0,5}{0,2}; \frac{0,2}{0,5})$,

возрастание E'_i формирующей ЛС. Кривые 1 и 2 – для $(\frac{0,6}{0,1}; \frac{0,1}{0,6})$. Кривые 3 и 4 – для $(\frac{0,4}{0,3}; \frac{0,3}{0,4})$; 5 и 6 – для $(\frac{0,5}{0,2}; \frac{0,2}{0,5})$.

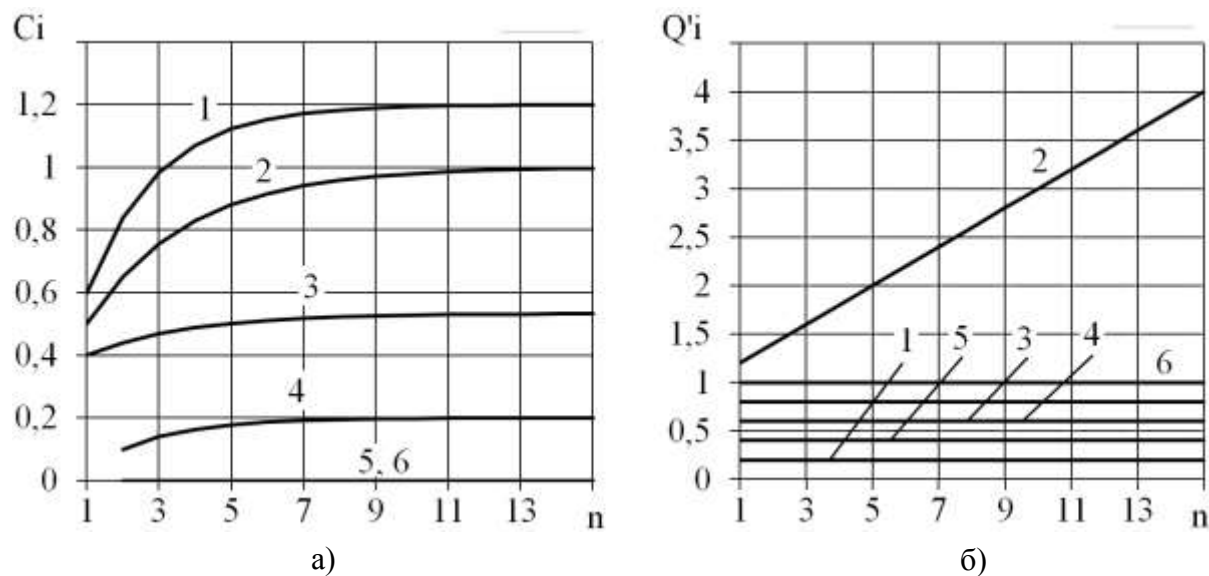


Рисунок 3.3 – Зависимость распределения долей элементов C_i в объеме V_i ЛС для различных долевых коэффициентов от номера импульса n (а); зависимость величин энергий E'_i , формирующих ЛС на аноде и катоде от номера импульса n (б)

Существенно меняется концентрация материалов в ЛС при перемещении электрода по поверхности. На рисунке 3.4 представлены значения долей материалов для второй и третьей стадий с разными значениями коэффициента M (1,0 – без перемещения; 0,7 и 0,8 соответственно с перемещениями).

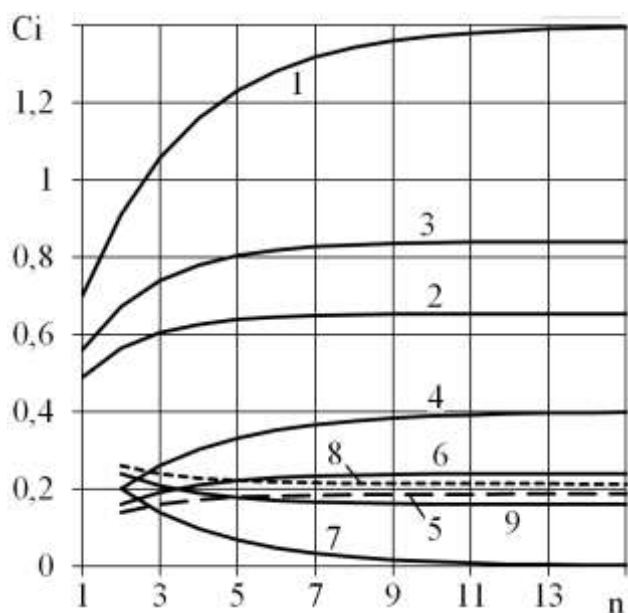


Рисунок 3.4 – Зависимость распределения долей элементов C_i в объеме V_i ЛС от номера импульса n

Так при коэффициенте равном 0,7 (при увеличении рабочей подачи электрода) преобладание материала в ЛС смещается в сторону катода, несмотря на ярко выраженный полярный эффект по отношению к аноду (для анода $x = 0,7$ для катода $x = 0,2$).

Данный факт объясняется конкурирующим влиянием доли материала катода (условие смещения смежных поверхностей в МЭП), участвующей в формировании импульсов, на элементный состав и величину энергии E'_i , формирующую ЛС.

Аналогичную ситуацию можно наблюдать и в трехкомпонентной модели. На рисунке 3.4 представлена зависимость распределения долей элементов C_i в объеме V_i от номера импульса n в ЛС для долевых коэффициентов $\left(\frac{0,7}{0,2}; \frac{0,2}{0,7}\right)$. Содержание материала анода на электроде катоде ($V_{k(a)}$) на второй и третьей стадиях. Значение M равно 1,0 и 0,7 и 0,8 соответственно для кривых 1, 4 и 2, 5 и 3, 6. Содержание материала катода на электроде катоде ($V_{k(k)(zf)}$) в третьей стадии при M , равным 1,0 и 0,7 и 0,8 соответственно для кривых 7, 8 и 9.

При определенных значениях долевого коэффициента « x » для порошка, концентрационным соотношением элементов в ЛС можно манипулировать не смотря на полярный эффект между электродами (анодом и катодом). Даже в случае осаждения порошка только на анод (кривые 1 и 3 рис. 3.5) покрытие на катоде в основном состоит из материала порошка. Данное соотношение обусловлено преобладающими значениями переноса материала (долевые коэффициенты « x », « y », « z ») для анода. Для повышения объемов порошка и материала анода в покрытии следует увеличивать энергию E'_i , формирующую ЛС данных элементов (рис. 3.5).

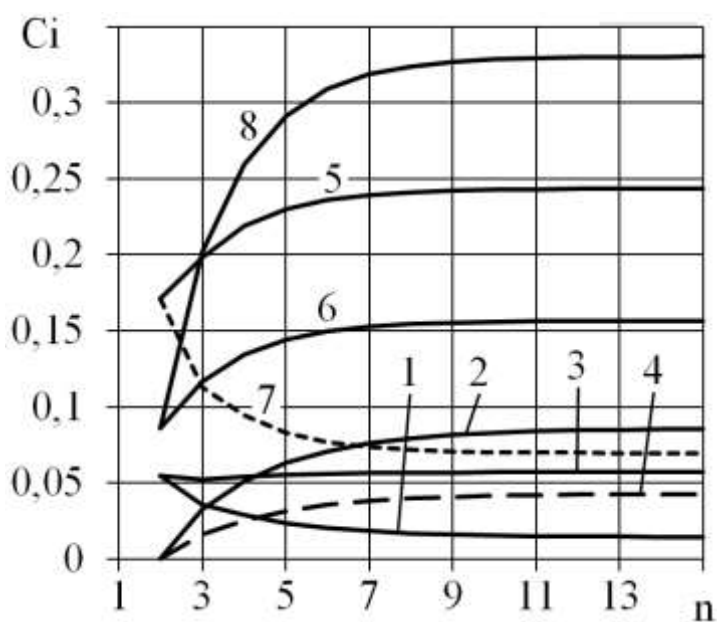


Рисунок 3.5 – Зависимость распределения долей элементов C_i в объеме V_i от номера импульса n в ЛС

На рисунке 3.5 представлена зависимость распределения долей элементов C_i в объеме V_i ЛС анода на третьей стадии для долевых коэффициентов $\left(\frac{0,6}{0,1}; \frac{0,2}{0,5}\right)$ и различных «х» порошка от номера импульса n . Значения «х» порошка для анода и катода: кривые 1, 2 – 0,6 и 0; кривые 3, 4 – 0,3 и 0; кривые 5, 6 – 0 и 0,7; кривые 7, 8 – 0,5 и 0,3. Содержание материала анода на электроде катоде $V_{k(a)(3f)}$ в третьей стадии – кривые 1, 3, 5, 7. Содержание материала порошка на электроде катоде $V_{k(p)(3f)}$ в третьей стадии – кривые 2, 4, 6, 8.

Для трехкомпонентной модели характерна прямая зависимость концентраций порошка и материалов электродов в ЛС от величины энергии и обратная зависимость от сопротивления электрической эрозии электродов и порошка. Наблюдается временный максимум концентрации материала электрода в ЛС в точке пересечения основных показателей для материалов элементов $V_{i(a,k,p)(1,2,3f)}$, (рис. 3.6). Данный факт выявлен при значениях «х», «у», «з» и количестве выделяющейся энергии Q_i , способствующих плавному формированию ЛС, и является следствием насыщения ЛС материалом электрода с последующей сменой доминирующего материала электрода на материал порошка.

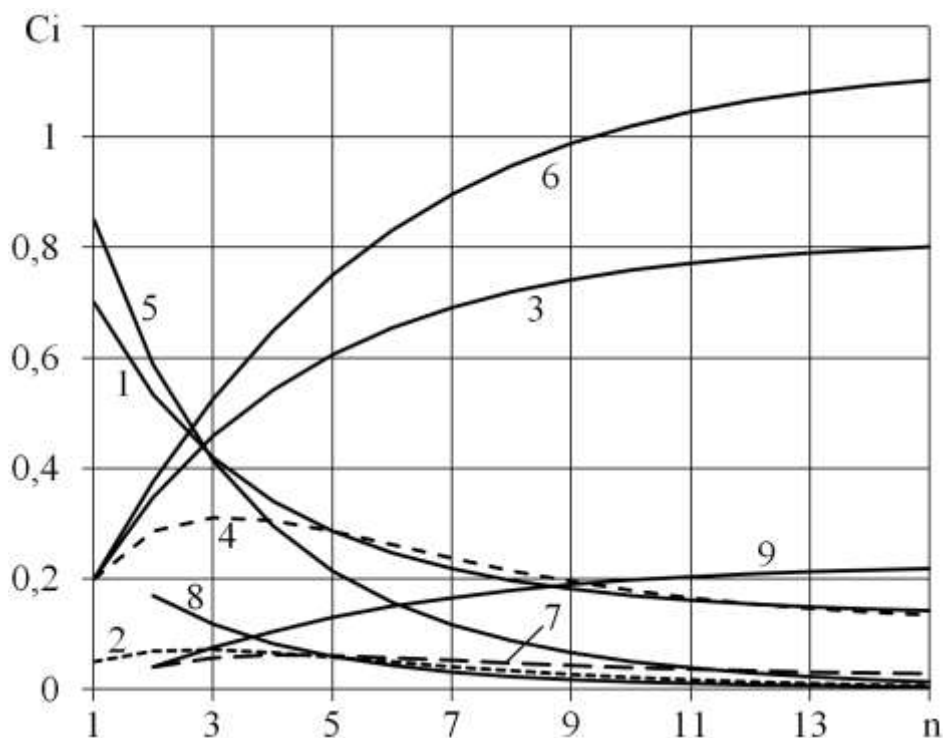


Рисунок 3.6 – Зависимость распределения долей элементов C_i в объеме V_i ЛС от номера импульса n

На рисунке 3.6 представлена зависимость распределения долей элементов C_i в объеме V_i ЛС от номера импульса n для долевых коэффициентов $\left(\frac{0,2}{0,7}; \frac{0,05}{0,85}\right)$. Величина энергии $Q_a = Q_k = \frac{1}{2} Q_p$. Перенос порошка во время разряда (значение x): на анод 0,1 и катод 0,1. Кривые 1, 2, 3 –

содержание на электроде аноде материала анода $V_{a(a)}$, материала катода $V_{a(k)}$ и материала порошка $V_{a(p)}$ на второй стадии. Кривые 4, 5, 6 – содержание на электроде катоде материала анода $V_{k(a)}$, материала катода $V_{k(k)}$ и материала порошка $V_{k(p)}$ на второй стадии. Кривые 7, 8, 9 – содержание на электроде катоде материала анода $V_{k(a)}$, материала катода $V_{k(k)}$ и материала порошка $V_{k(p)}$ на третьей стадии.

На рисунке 3.7 представлена зависимость распределения долей элементов C_i в объеме V_i ЛС от номера импульса n для долевых коэффициентов $\left(\frac{0,2}{0,7}; \frac{0,05}{0,85}\right)$. Величина энергии $\frac{1}{2}Q_a = Q_k = Q_p$. Перенос порошка во время разряда (значение x): на анод 0,1 и катод 0,1. Кривые 1, 2, 3 – содержание на электроде аноде материала анода $V_{a(a)}$, материала катода $V_{a(k)}$ и материала порошка $V_{a(p)}$ на второй стадии. Кривые 4, 5, 6 – содержание на электроде катоде материала анода $V_{k(a)}$, материала катода $V_{k(k)}$ и материала порошка $V_{k(p)}$ на второй стадии. Кривые 7, 8, 9 – содержание на электроде катоде материала анода $V_{k(a)}$, материала катода $V_{k(k)}$ и материала порошка $V_{k(p)}$ на третьей стадии.

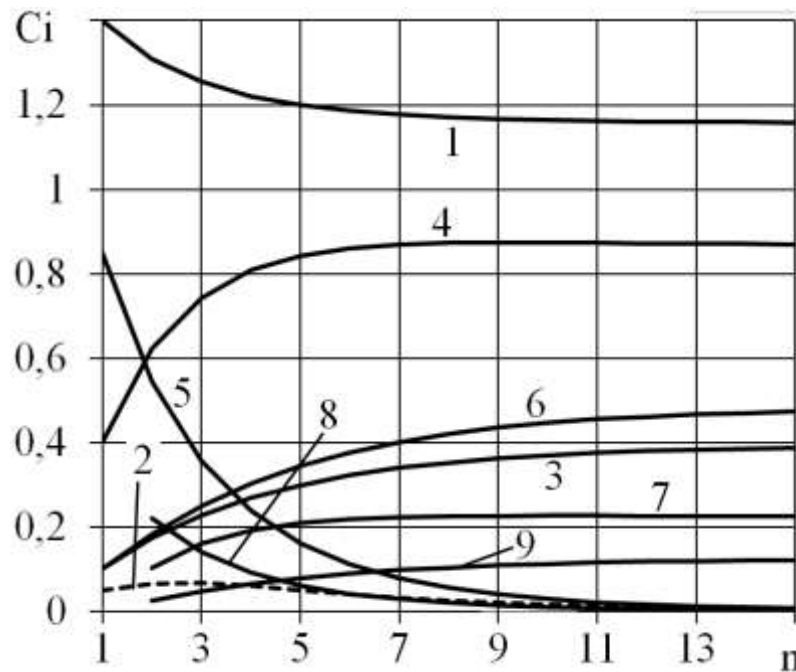


Рисунок 3.7 – Зависимость распределения долей элементов C_i в объеме V_i ЛС от номера импульса n

Рассмотренные в работе графики отражают концентрационное изменение элементов модели в идеализированных условиях. В представленных математических формулах для расчетов основных параметров модели использовались сравнительные технологические характеристики изучаемого процесса в упрощенной форме с учетом их линейного поведения [98]. На основе полученных данных можно прогнозировать поведение материала в МЭП, формирование ЛС, строить более сложные зависимости элементного состава материалов.

Для перехода от значений объемов к толщинам слоев [50] можно использовалось соотношения (3.6) и (3.7):

$$h_i = Z_{mi}Q_i,$$

где h_i – толщина $i^{\text{того}}$ слоя;

Z_{mi} – коэффициент, величина которого не зависит от энергии разряда.

Следует:

$$h_i = Z_{mi}Z_iV_i \quad (3.16)$$

Ниже приведены результаты расчета для трехкомпонентной модели в зависимости от скорости электрической эрозии обрабатываемых материалов [49, 6] и количества выделяющейся энергии во время электрического разряда E_p .

$$E_p = I_k U_o t_{и} \quad (3.17)$$

Здесь I_k – величина тока короткого замыкания, A ;

U_o – напряжение между электродами, B ;

$t_{и}$ – длительность импульса напряжения, $мкс$.

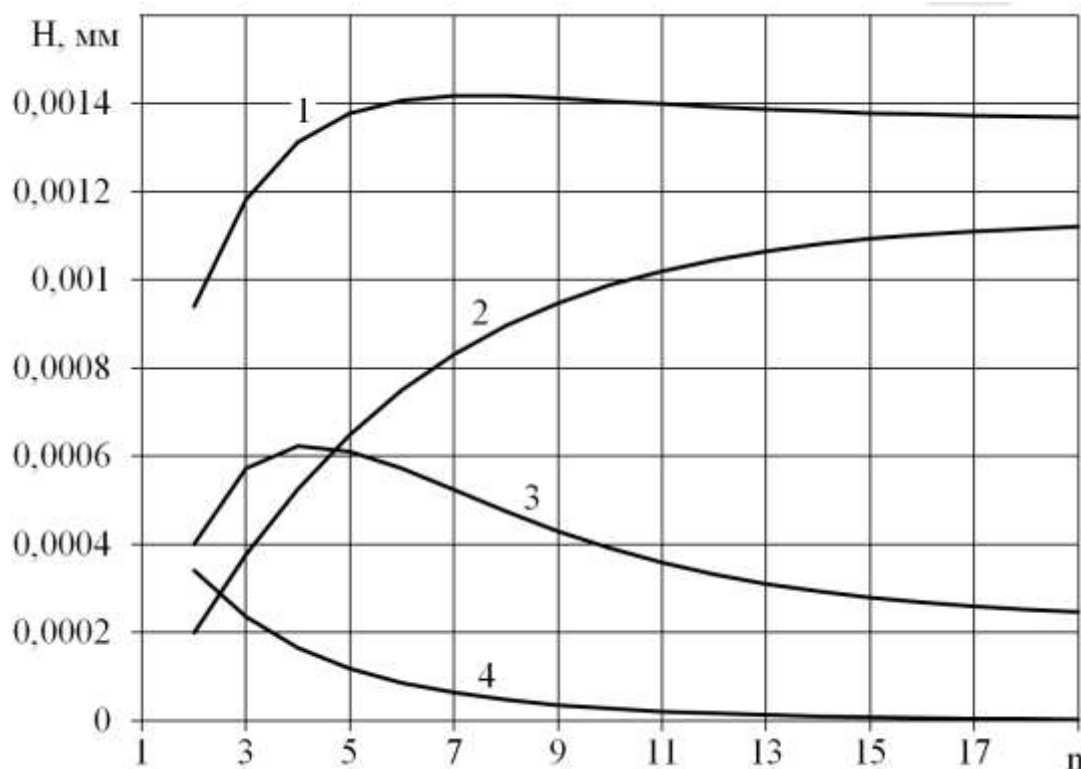


Рисунок 3.8 – Толщины слоев, получаемые при легировании стали ЭИ961 электродом из Ti и, дополнительно, введением в МЭП материала из Ta

Из графиков рисунка 3.8 следует, что формирование слоя происходит в очень коротких интервалах для идеальных условий, с учетом оговоренных выше допущений. Кривая 1 – толщина слоя после каждого разряда. Кривые 2, 3, 4 – соответственно соотношение легирующих материалов в подложке (тантал, титан, сталь). Концентрационное соотношение элементов в дальнейшем стабилизируется, что говорит о необходимости подбора оптимального удельного времени легирования единицы поверхности.

Для расчета основных параметров модели переноса материалов и формирования ЛС при ЭИЛ был написан программный код, позволяющий быстро и в удобной форме произвести расчет и анализ большого числа импульсов. Программный код был зарегистрирован в Реестре программ для ЭВМ. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011618718 (заявка №2011616890) [27]. Для написания кода, был задействован язык объектно-ориентированного программирования Visual C++. Язык позволяет управлять элементами любой сложности, создавая условия для многократного применения программных компонентов, объединяя данные с методами манипуляции ими. Что позволило представить факторы, влияющие на модель, а также ее составляющие в виде взаимозависимых модулей, тем самым обеспечив гибкое управление, как характеристиками, так и ее структурой.

3.2. Моделирование формирования остаточных напряжений

Метод конечных элементов является одним из вариационных методов и часто трактуется как метод Ритца. Область, занимаемая телом, разбивается на конечные элементы. Чаще всего это треугольники в плоском случае и тетраэдры в пространственном. Внутри каждого элемента задаются некоторые функции формы, позволяющие определить перемещения внутри элемента по перемещениям в узлах, т.е. в местах стыков конечных элементов. За координатные функции принимаются функции, тождественно равные нулю всюду, кроме одного конечного элемента, внутри которого они совпадают с функциями формы. В качестве неизвестных коэффициентов метода Ритца берутся узловые перемещения. После минимизации функционала энергии получается алгебраическая система уравнений (так называемая основная система). Таким образом, ситуация здесь такая же, как и в вариационных разностных методах, в которых для получения разностной системы уравнений применяется один из вариационных принципов [43].

Полная потенциальная энергия упругого тела, при условии нагружения его объемными и поверхностными силами, находится по следующему выражению [110, 74]:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\varepsilon}' \boldsymbol{\sigma} dv - \int_V \mathbf{u}' \mathbf{G} dv - \int_S \mathbf{u}' \mathbf{p} ds,$$

где \mathbf{u} – вектор перемещений точек;

\mathbf{p} – вектор поверхностной нагрузки, приложенной в точках поверхности S ;

\mathbf{G} – вектор объемных сил, приложенных в точках объема V ;

$\boldsymbol{\varepsilon}$ – матрица-столбец деформаций;

$\boldsymbol{\sigma}$ – матрица-столбец напряжений.

Векторы \mathbf{u} , \mathbf{p} и \mathbf{G} в случае трехмерного напряженного состояния в исследуемом теле можно представить:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}; \quad \mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix}$$

Матрицы-столбцы $\boldsymbol{\varepsilon}$ и $\boldsymbol{\sigma}$ представим как:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix}$$

Соотношения Коши, связывают матрицу-столбец деформаций $\boldsymbol{\varepsilon}$ с вектором перемещений \mathbf{u} , и в матричной форме могут быть представлены как:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}\mathbf{u}$$

Где \mathbf{D} матричный дифференциальный оператор

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & & & & & \\ & \frac{\partial}{\partial y} & & & & \\ & & \frac{\partial}{\partial z} & & & \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & & & & \\ & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & & & \\ \frac{\partial}{\partial z} & & \frac{\partial}{\partial x} & & & \end{bmatrix}$$

Обобщенным законом Гука связаны матрица-столбец напряжений $\boldsymbol{\sigma}$ и матрица-столбец деформаций $\boldsymbol{\varepsilon}$. В матричной форме выражение имеет вид:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{H}\boldsymbol{\varepsilon},$$

где \mathbf{H} – матрица Гука,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & & & & & & \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & & & & & & \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & & & & & & \\ & & & 0 & \mu & 0 & 0 & & \\ & & & 0 & 0 & \mu & 0 & & \\ & & & 0 & 0 & 0 & \mu & & \end{bmatrix}$$

Значения λ и μ являются постоянными Ляме. Они могут быть выражены через характеристики материала: модуль Юнга E и коэффициентом Пуассона ν следующими уравнениями:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}; \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

При наличии в системе начальных деформаций $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ матрица-столбец напряжений примет вид:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{H}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_0)$$

В результате чего окончательное выражение полной потенциальной энергии системы с учетом присутствия $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ представляется следующим:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\varepsilon}' \mathbf{H} \boldsymbol{\varepsilon} dv - \int_V \boldsymbol{\varepsilon}' \mathbf{H} \boldsymbol{\varepsilon}_0 dv - \int_S \mathbf{u}' \mathbf{p} ds - \int_S \mathbf{u}' \mathbf{G} dv$$

Для решения задач термоупругости, необходимо решить соответствующую задачу теории теплопроводности. Так, для определения температурных полей, краевая задача теории теплопроводности описывается следующими зависимостями [110, 93, 90]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + RT + Q = 0 \quad (3.18)$$

$$T|_{C_T} = T_0$$

$$q|_{C_q} = - \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right)$$

$$h(T - T_\infty)|_{C_h} = - \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) \quad (3.19)$$

где T – температура;

Q – внутренний источник или сток теплоты;

R – внутренний источник или сток теплоты, пропорциональный температуре;

h – коэффициент теплоотдачи на границе C_h ;

T_∞ – температура среды;

q – тепловой поток на границе C_q ;

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – коэффициенты теплопроводности в направлении осей анизотропии;

n_x, n_y, n_z – направляющие косинусы внешней нормали к поверхности.

Поставленная задача имеет вариационную формулировку: решение уравнения (3.18) при граничных условиях (3.19) эквивалентно отысканию в фиксированный момент времени минимума функционала:

$$\begin{aligned} \chi = & \frac{1}{2} \int_V \left(\lambda_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 - RT^2 \right) dv - \\ & - \int_V QT dv + \int_{C_q} qT ds + \int_{C_h} h \left(\frac{1}{2} T - T_\infty \right) T ds \end{aligned} \quad (3.20)$$

Введем две элементные матрицы:

– матрицу-столбец градиентов температуры

$$\text{grad } T = \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{bmatrix} = \mathbf{D} T$$

И матрицу коэффициентов теплопроводности

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{bmatrix},$$

где \mathbf{D} – матричный дифференциальный оператор

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix}$$

В изотропном материале коэффициенты в матрице \mathbf{H} заменяются скаляром $\lambda = \lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$.

Тогда функционал (3.20) будет представлять

$$\begin{aligned} \chi = & \frac{1}{2} \int_V \text{grad } T' \mathbf{H} \text{ grad } T dv - \frac{1}{2} \int_V RT^2 dv - \int_V QT dv + \\ & + \int_{C_q} qT ds + \int_{C_h} hT \left(\frac{1}{2} T - T_\infty \right) ds \end{aligned} \quad (3.21)$$

Функционал (3.21) является исходным в общей процедуре метода конечных элементов.

При помощи программного комплекса, использующего метод Ньютона-Рафсона, DEFORM-2D были смоделированы воздействия высококонцентрированного точечного источника тепла на поверхность образца. Предварительно, в том же программном пакете, образцу придавали три различных состояния. В первом случае образец (первого типа) находился в свободном состоянии. Во втором случае, перед воздействием точечного источника тепла, на поверхности образца создавали растягивающие напряжения (образец второго типа выгибали). В третьем случае, перед воздействием точечного источника тепла, на поверхности образца создавали сжимающие напряжения (образец третьего типа прогибали). Для этого накладывались ограничения на перемещения образцов в виде связей по краям [62].

Задача решалась в двумерной постановке (модуль Deform2D), что позволяло в полной мере описать все граничные условия для данного процесса, исключив затраты машинного времени, при вычислении её в объемной постановке [114].

После прекращения действия точечного источника тепла моделировалось выравнивание температуры образца до нормальных внешних условий. Затем, в зависимости от напряженного состояния поверхности образца, моделировались условия снятия нагрузки.

Модель образца представляла собой пластину со сторонами $10 \times 0,1$ мм. Моделировался разряд длительностью 10 мкс. Размеры пластины обусловлены оптимальным соотношением звена конечноэлементной сетки и ресурсами вычислительной машины. Периодичность расположения точечного источника составляет $L = 3,5$ микрона – длина грани минимального звена конечноэлементной сетки. При расчетах условием одновременного возникновения нескольких точечных источников на поверхности являлась их дискретность расположения в интервале $4L \dots 10L$.

Образец в модели наделяли следующими физическими характеристиками [154], табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Физические характеристики исследуемого материала

Материал	коэффициент Пуассона, μ	Предел прочности			Предел текучести, [MPa]	Относительное удлинение, %
		растяжение, [MPa]	сжатие, [MPa]	сдвиг, [MPa]		
Титан	0,31	1159	1138	690	1055	9

Ниже представлены результаты проведенных экспериментов при описанных выше условиях (рис. 3.9–3.10).

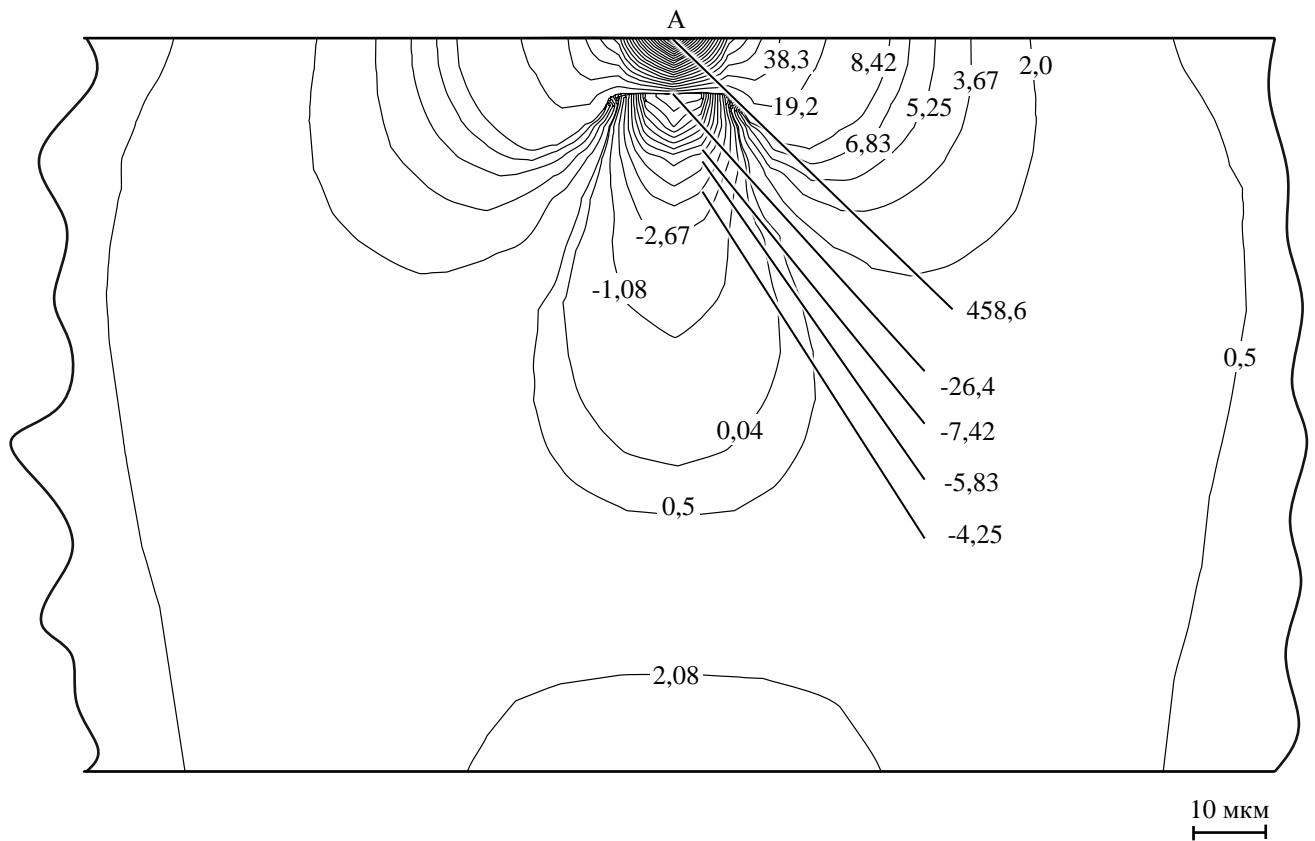
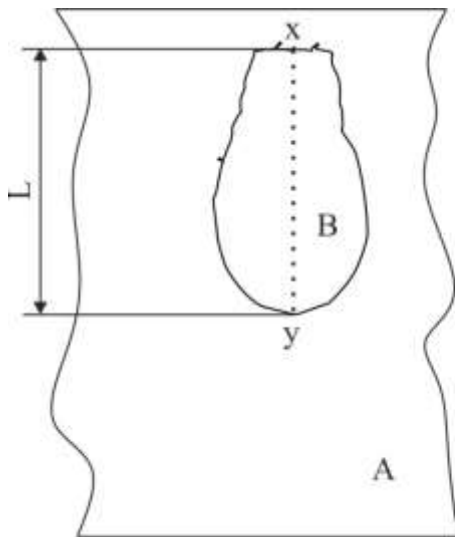
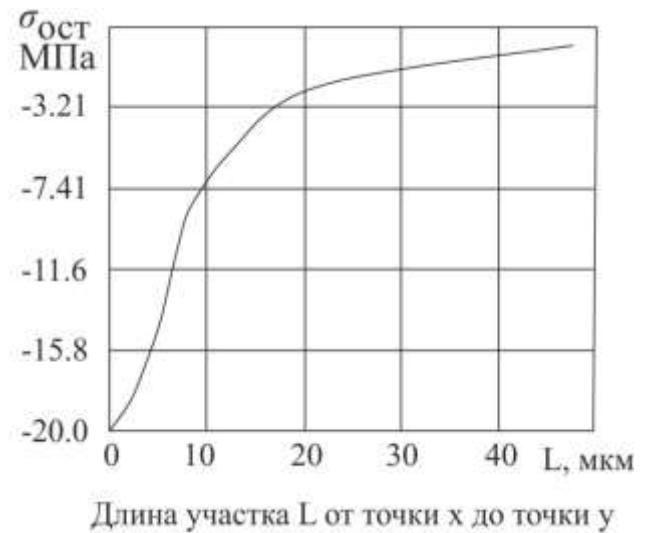


Рисунок 3.9 – Остаточные напряжения по толщине образца после единичного разряда, МПа

На рисунке 3.9 представлено распределение остаточных напряжений в плоскости максимальных главных напряжений. На поверхности, в точке «А», имитировался искровой разряд: температурный всплеск с верхней границей 1270 °С. В точке разряда не учитывались явления испарения и выброса материала в окружающую среду. Зона наибольших сжимающих напряжений находится на глубине 10-15 мкм. Изменение зоны с отрицательными напряжениями по глубине образца представлено на графике (рис. 3.10, б).



а)



б)

Рисунок 3.10 – Область с положительными «А» и отрицательными «В» остаточными напряжениями от единичного разряда (а); график распределения отрицательных напряжений на участке L от точки x до точки y (б)

Перераспределение зон с положительными (светлая область) и отрицательными (темная область) остаточными напряжениями в плоскости максимальных главных напряжений при условии многократного воздействия разряда на поверхность образца представлено на рисунке 3.11. Моделировалось одновременное возникновение нескольких точечных источников тепла на поверхности, последующее остывание образца до окружающей температуры. Оценивались показатели зон остаточных напряжений, а также максимальная величина прогиба (рис. 3.11, №1). После чего координаты расположения формирующихся точечных источников тепла смещались на величину $2L - 4L$. Затем условия эксперимента повторялись. Повторно оценивались результаты эксперимента (рис. 3.11, №2). Всего проведено десять циклов разряд-остывание.



Рисунок 3.11 – Перераспределение зон с положительными (светлая область) и отрицательными (темная область) остаточными напряжениями после десяти циклов разряд-остывание в плоскости максимальных главных напряжений, (МПа). Максимальная величина прогиба образца в скобках, (мкм)

Влияние предварительно наведенных растягивающих и сжимающих напряжений в поверхностном слое оценивалось в эксперименте, результаты которого представлены на рисунках 3.12 и 3.13. На рисунке 3.12 представлено распределение остаточных напряжений в поверхностном слое образцов после нескольких циклов разряд-остывание. Наибольшие растягивающие напряжения наблюдаются в поверхностном слое образца третьего типа (перед воздействием точечного источника тепла, на поверхности моделировали сжимающие напряжения). Наименьшие растягивающие остаточные напряжения обнаруживаются на подвергнутой нескольким циклам разряд-остывание поверхности с предварительно смоделированными растягивающими напряжениями.

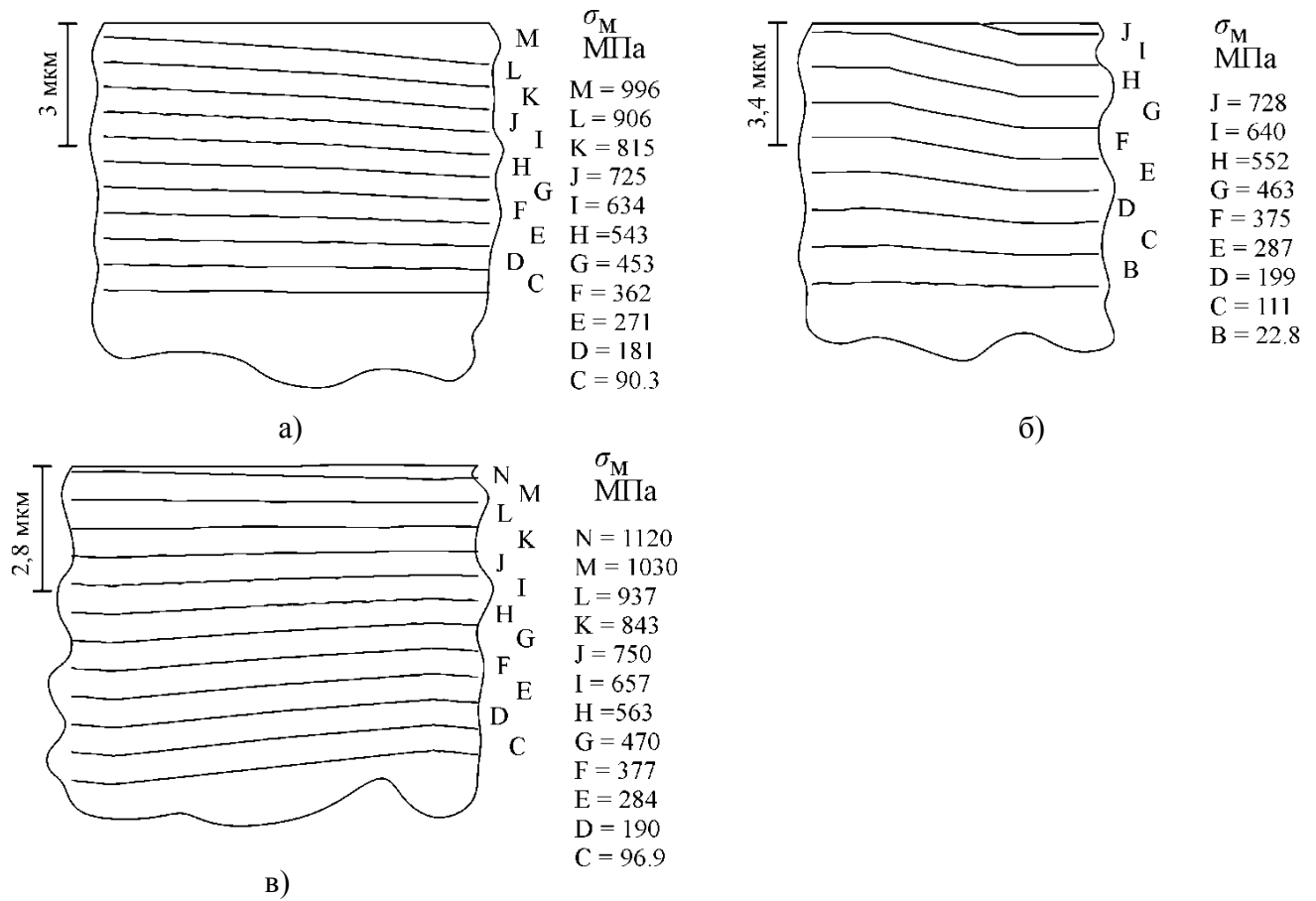


Рисунок 3.12 – Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое после легирования. Первый тип образцов (а), второй тип образцов (б), третий тип образцов (в)

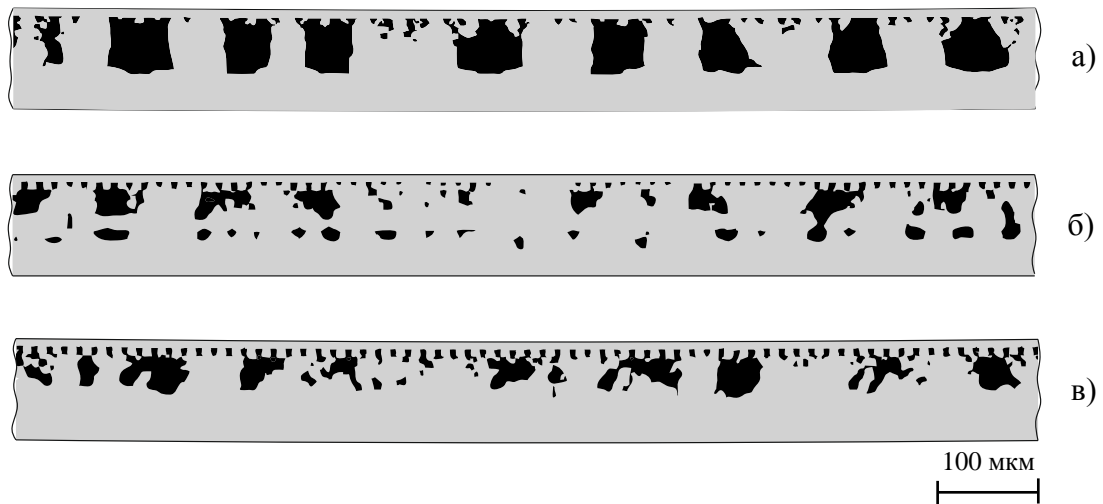


Рисунок 3.13 – Области с положительными (светлая область) и отрицательными (темные пятна) остаточными напряжениями в пластинках. Образцы первого типа (а), образцы второго типа (б), образцы третьего типа (в)

На основании данных, представленных на рисунках 3.12 и 3.13, сделан вывод, что образцы с предварительно созданными растягивающими напряжениями (рис. 3.12, б и рис. 3.13, б) после легирования и разневоливания имеют минимальные растягивающие

напряжения на поверхности. Остаточные напряжения сжатия наиболее равномерно распределены по всей глубине пластины.

3.3. Обеспечение равномерности электроискрового упрочнения поверхностей деталей

Для упрочнения плоских поверхностей обычно используется схема, показанная на рисунке 3.14, *а*. ЛЭ устанавливается перпендикулярно обрабатываемой поверхности, а характер его перемещений определяется конфигурацией детали. Поскольку ширина полосы упрочненного материала, образующейся за движущимся электродом, не превышает его диаметра, для упрочнения протяженных поверхностей обработку ведут таким образом, чтобы обеспечивалось взаимное перекрытие полос. Для обеспечения требуемой износостойкости или антифрикционных свойств часто нет необходимости в получении сплошного покрытия. Достаточно выполнить упрочнение отдельных участков, равномерно расположенных по поверхности (поверхностное армирование). В этом случае ЛЭ задается движение по закону, обеспечивающему формирование, например, ячеек шестиугольной формы (рис. 3.14, *з*) или других конфигураций [6].

Для упрочнения труднодоступных участков, например пазов, используют обработку наклоненным электродом (рис. 3.14, *б*). Обработку наружных поверхностей вращения выполняют при вращательном движении заготовки (рис. 3.14, *д*) с применением стержневых или трубчатых ЛЭ [Там же].

При упрочнении внутренних поверхностей целесообразно использовать дисковые электроды (рис. 3.14, *в*), или, для неглубоких отверстий, наклоненные стержневые электроды.

Обработку отверстий в корпусных деталях можно производить при работе следящей системы, поддерживающей межэлектродный зазор, в цилиндрической системе координат. Упрочнение выполняется дисковым или стержневым ЛЭ (рис. 3.14, *е*), в зависимости от диаметра и глубины упрочняемого отверстия. Использование перечисленных схем определяет универсальность ЭИЛ, применимость его для упрочнения деталей различной конфигурации.

Характерной особенностью ЭИЛ является дискретность упрочнения. Оно производится следующими друг за другом электрическими разрядами, причем каждый разряд воздействует на свой малый локальный участок поверхности, величина которого зависит от энергии разряда. Сплошность упрочнения достигается перекрытием отдельных зон воздействия разрядов.

При прочих равных условиях, качество упрочненного слоя определяется кратностью воздействия разрядов на каждый участок поверхности, которую удобно оценивать коэффициентом кратности j . Среднее его значение j_c , находится как:

$$j_c = N \frac{S_0}{S_y} = \frac{f_p S_0 t}{S_y},$$

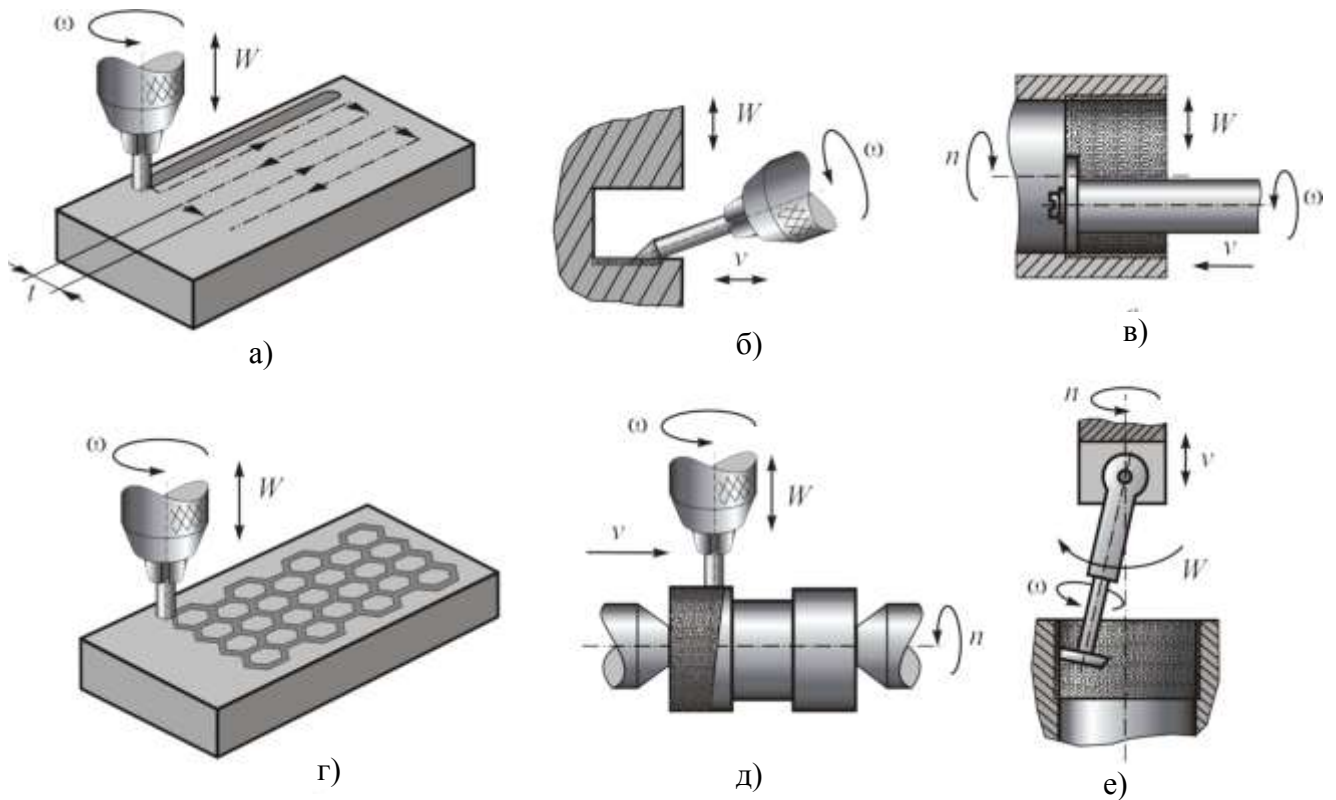


Рисунок 3.14 – Базовые схемы ЭИЛ вращающимся ЛЭ

где N – число электрических разрядов, воздействовавших на поверхность площадью S_y ; S_0 – площадь поверхности, упрочняемая единичным разрядом; t – время упрочнения.

Производительность ЭИЛ Π связана с коэффициентом кратности соотношением:

$$\Pi = \frac{S_y}{t} = \frac{f_p S_0}{j_c}$$

Очевидно, что при заданном качестве упрочнения, единственным способом повышения производительности ЭИЛ является увеличение частоты электрических разрядов.

Выявим влияние j на вероятность получения сплошного ЛС. Вероятность P_0 попадания электрического разряда на поверхность площадью S_0 составляет:

$$P_0 = \frac{S_0}{S_y}$$

Используя формулу Бернулли, можно показать, что вероятность P_0 , n того, что разряд не попадет на поверхность S_0 при равной вероятности попадания в любую точку упрочняемой поверхности и числе электрических разрядов $n = \frac{S_0}{S_y}$ будет составлять:

$$P_0, n = \left(1 - \frac{S_0}{S_y}\right)^{\frac{S_y}{S_0}}$$

Вероятность $P_{\Pi, n}$ попадания разрядов на поверхность S_0 определится как:

$$P_{П, n} = 1 - \left(1 - \frac{s_0}{s_y}\right)^{\frac{s_y}{s_0}}$$

Применив закон Пуассона, найдем вероятность $P_{СП}$ получения сплошного покрытия:

$$P_{СП} = 1 - \exp\left(\left(\left(1 - \frac{s_0}{s_y}\right)^{\frac{s_y}{s_0}} - 1\right)j_c\right)$$

Учитывая, что отношение $\frac{s_0}{s_y}$ стремится к нулю получим:

$$P_{СП} = 1 - e^{1-j_c}$$

Расчеты по этой формуле, приведенные в таблице 3.2 показывают, что для гарантированного сплошного упрочнения требуется, чтобы j_c было большим 4. На практике качественное упрочнение достигается при $j_c = 4 \dots 6$.

Таблица 3.2 – Вероятность получения сплошного покрытия

Коэффициентом кратности j_c	1	2	3	4	5	6
Вероятность получения сплошного покрытия $P_{СП}$	0	0,6320	0,8647	0,9502	0,9817	0,9933

Из дискретного характера ЭИЛ вытекает необходимость обеспечения равномерности распределения электрических разрядов по упрочняемой поверхности с целью получения сплошного и стабильного упрочненного слоя. Равномерность упрочнения в основном определяется кинематикой процесса ЭИЛ, стабильностью и способом коммутирования межэлектродного зазора, геометрической формой и расположением ЛЭ относительно упрочняемой поверхности.

При использовании для ЭИЛ ручных устройств, обеспечить равномерность упрочнения достаточно сложно. В этом случае она зависит от квалификации рабочего. При работе на механизированных установках и установках с ЧПУ появляется возможность точного задания траектории перемещения ЛЭ и его расположения относительно упрочняемой поверхности. Упрочнение обычно производят строками с взаимным перекрытием упрочненных полос, и равномерность упрочнения зависит от характера перекрытия.

При упрочнении вращающимся ЛЭ наибольшее применение имеют три схемы: упрочнение торцом перпендикулярно расположенного стержневого электрода, наклоненным электродом и дисковым электродом (рис. 3.14). Рассмотрим особенности обеспечения равномерности упрочнения при использовании дискового электрода на внутренней цилиндрической поверхности (рис. 3.15).

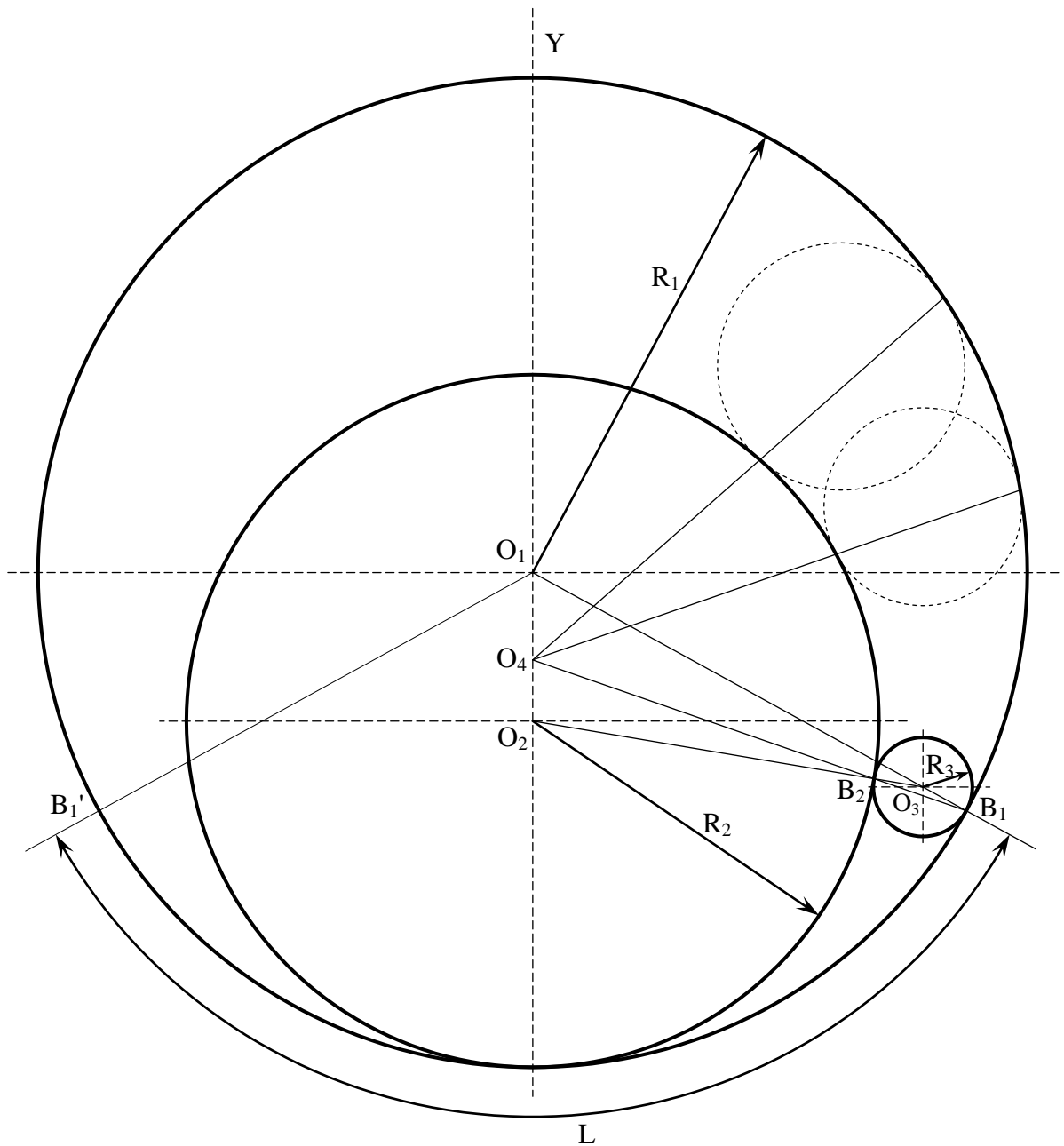


Рисунок 3.15 – Обеспечение равномерности упрочнения дисковым электродом внутренней цилиндрической поверхности

На рисунке 3.15 даны три окружности (1, 2, 3) с центрами O_1 и O_2 и O_3 и, соответственно, радиусами R_1, R_2 и R_3 . Причем $R_1 \geq R_2$ и $R_1 \geq R_3$.

Центр окружности O_1 и окружности O_2 лежит на общей оси ординат Y . Причем окружность O_2 касательна к окружности O_1 . Расстояние между центрами окружностей O_1 и O_2 меньше R_1 ($O_1O_2 \leq R_1$).

Окружность 3 находится внутри окружности 1 и снаружи окружности 2. Причем окружность 3 касается окружности 1 и окружности 2.

Отрезок O_1B_1 , проходит через центры окружностей O_1 и O_3 . Отрезок O_2O_3 проходит через центры окружностей O_2 и O_3 . Отрезок B_1B_2 является хордой окружности 3. Продолжение отрезка B_1B_2 пересекает ось ординат в точке O_4 .

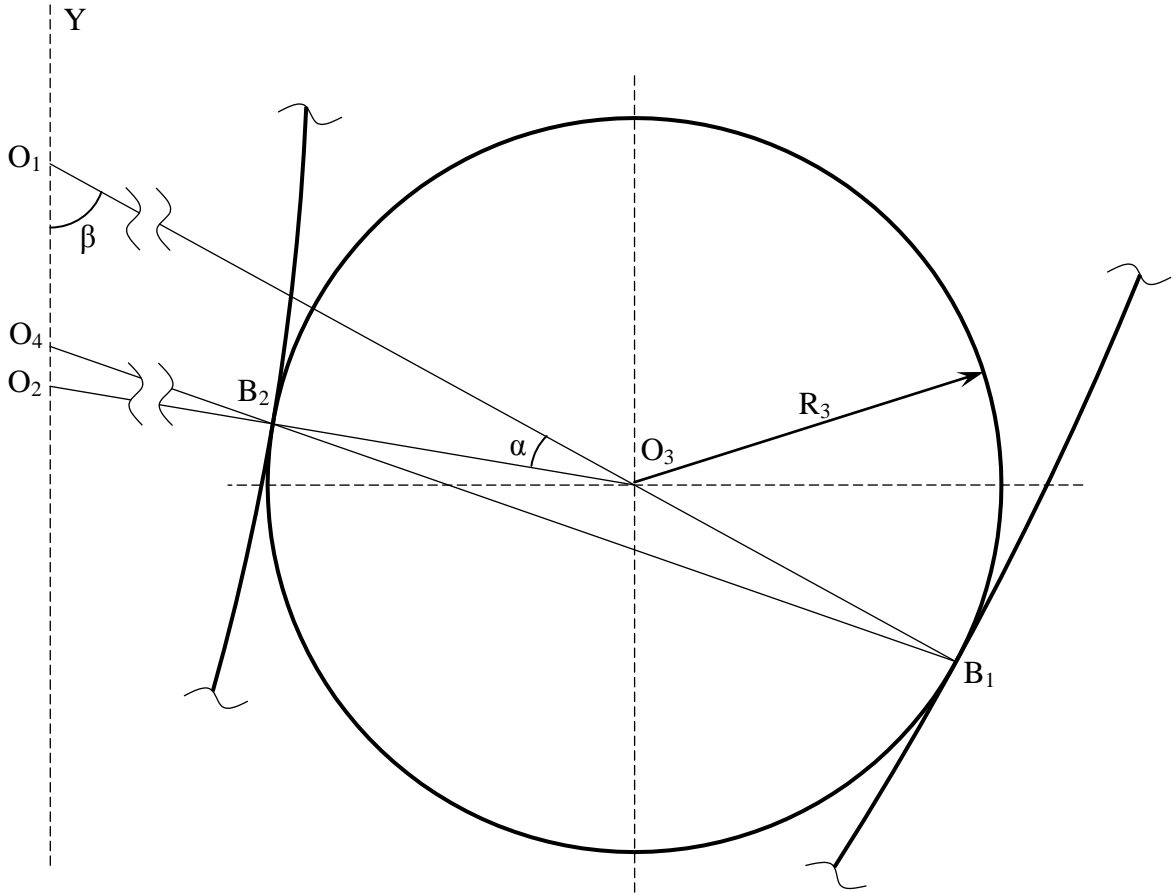


Рисунок 3.16 – Геометрическое представление углов

Точка O_4 является центром пересечения хорд всех мнимых окружностей, получаемых из окружности 3, изменением её радиуса от 0 до $\frac{1}{2}(R_1 - R_2)$.

Зеркальным отражением точки B_1 , относительно оси ординат, является точка B'_1 . Обозначим длину дуги $B_1B'_1$ буквой L .

Необходимо найти длину дуги L при длине отрезка B_1B_2 , равным максимальному расстоянию при котором возникает пробой МЭП.

Для этого выразим длину дуги L через переменные R_1 и R_2 и R_3 . Причем, значение R_3 выразим через переменные R_1 и R_2 и хорду B_1B_2 , равную максимальному расстоянию (численное значение), при котором возникает пробой МЭП (рис. 3.16).

Представим угол $\angle B_1O_3B_2$ выражением $180^\circ - \alpha$, а угол $\angle O_2O_1O_3$ буквой β .

По теореме косинусов, в косоугольном треугольнике $\Delta O_1O_2O_3$ косинус угла α равен:

$$\cos \alpha = \frac{(R_1 - R_3)^2 + (R_2 + R_3)^2 - (R_1 - R_2)^2}{2(R_1 - R_3)(R_2 + R_3)} \text{ после преобразований получаем:}$$

$$\cos \alpha = \frac{R_3(R_3 - R_1) + R_2(R_3 + R_1)}{(R_1 - R_3)(R_3 + R_2)}$$

Хорду B_1B_2 представим как $B_1B_2 = 2R_3 \sin\left(\frac{180-\alpha}{2}\right)$.

Применим формулу половинного аргумента для угла, и после преобразований получим:

$$B_1B_2 = 2R_3 \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{R_3(R_3 - R_1) + R_2(R_3 + R_1)}{(R_3 + R_2)(R_1 - R_3)} \right)} \quad (3.22)$$

Подставив в формулу (3.22) заданные переменные R_1 и R_2 , находим значение переменной R_3 , при котором выполняется условия пробоя МЭП на отрезке B_1B_2 .

Определив значение переменной R_3 , найдем переменную L .

Угол $\angle B_1O_1B_1'$ равен 2β . Значит $L = \frac{\pi R_1 2\beta}{180}$.

По теореме косинусов в косоугольном треугольнике $\Delta O_2O_1O_3$ косинус угла β равен:

$$\cos \beta = \frac{(R_1 - R_2)^2 + (R_1 - R_3)^2 - (R_2 + R_3)^2}{2(R_1 - R_2)(R_1 - R_3)}$$

после преобразований получаем:

$$\cos \beta = \frac{R_1(R_1 - R_2) - R_3(R_1 + R_2)}{(R_1 - R_2)(R_1 - R_3)}$$

Переведем полученное значение в градусы. После преобразований получим:

$$L = 2R_1 \arccos\left(\frac{R_1(R_1 - R_2) - R_3(R_1 + R_2)}{(R_1 - R_2)(R_1 - R_3)}\right)$$

Ниже представлены графики влияния переменных R_1 и R_2 и R_3 на площадь легируемой поверхности. Соответственно окружность 1 является поперечным (радиальным) сечением поверхности зеркала цилиндра, подвергающейся легированию. Окружность 2 является поперечным (радиальным) сечением дискового ЭИ. Величина L и толщина диска ЭИ t образуют поверхность на зеркале цилиндра. Данную площадь пятна контакта обозначим S .

$$S = Lt$$

Ограничим область поиска переменных физически значимыми для нашего эксперимента численными величинами, в миллиметрах:

$$20 \leq R_1 \leq 200,$$

$$10 \leq R_2 \leq 199,$$

$$0,001 \leq R_3 \leq 0,15$$

Так как зависимость между R_3 и хордой B_1B_2 , в рассматриваемой области величин, линейная (рис. 3.17), при расчете длины дуги L , а также влияния переменных R_2 и R_1 на площадь легирования S , будем оперировать переменной R_3 с некоторым переводным коэффициентом.

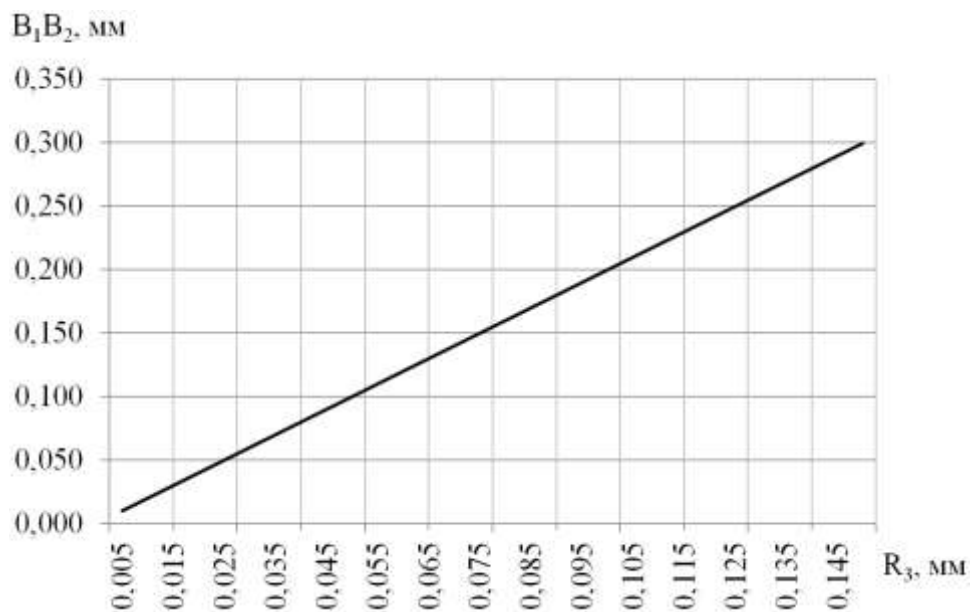


Рисунок 3.17 – Влияние величины R_3 на длину хорды B_1B_2

На основании графиков рисунка 3.18, при изменении диаметрального размера электрода на 2 мм (с $50/49 = 0,98$ до $50/48 = 0,96$), площадь пятна контакта уменьшается в 1,43 раза (соответственно с $21,02$ до $14,7 \text{ мм}^2$) для кривой 1. Величина МЭП (R_3) равна соответственно: кривая 1 – $0,005 \text{ мм}$; кривая 2 – $0,01 \text{ мм}$; кривая 3 – $0,015 \text{ мм}$. Начальные значения R_2 и R_1 взяты соответственно: 49 мм и 50 мм . Толщина диска ЭИ t принята $1,5 \text{ мм}$.

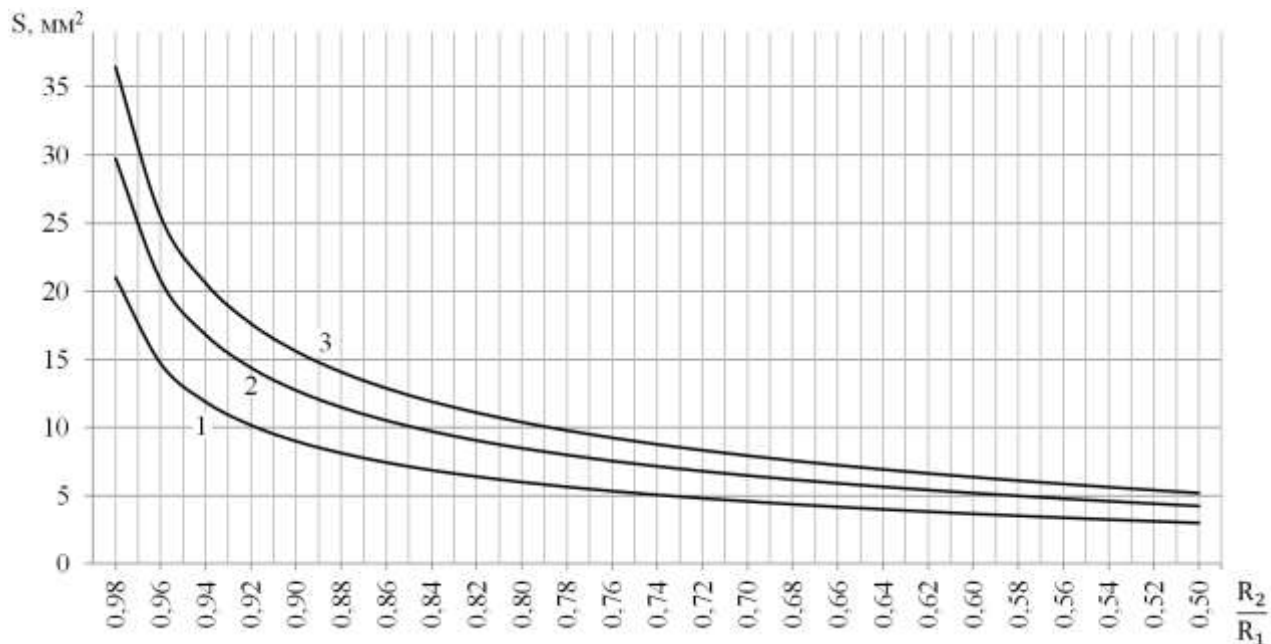


Рисунок 3.18 – Влияние отношения диаметров ЭИ и обрабатываемого цилиндра (R_2/R_1) на площадь пятна контакта S

Для кривых 2 и 3 по отношению к кривой 1 коэффициент величины потери S увеличивается незначительно (значения четвертого порядка после запятой).

Из полученных выше результатов, можно заключить о незначительном влиянии величины пробоя межэлектродного зазора на сплошность покрытия, получаемого данным способом.

Однако, износ ЭИ на 2 мм и более, может серьезно повлиять на сплошность покрытия, а также стабильность качественных и количественных характеристик формируемого поверхностного слоя.

На основании графиков рисунка 3.19, изменение величины МЭП (R_3) оказывает сильное влияние на пятно контакта S , только при близких по значению радиусах электрода и обрабатываемой цилиндрической поверхности (R_1 и R_2). Что говорит о необходимости обеспечения стабильных технологических характеристик процесса ЭИЛ на начальных этапах обработки (когда инструмент менее изношен).

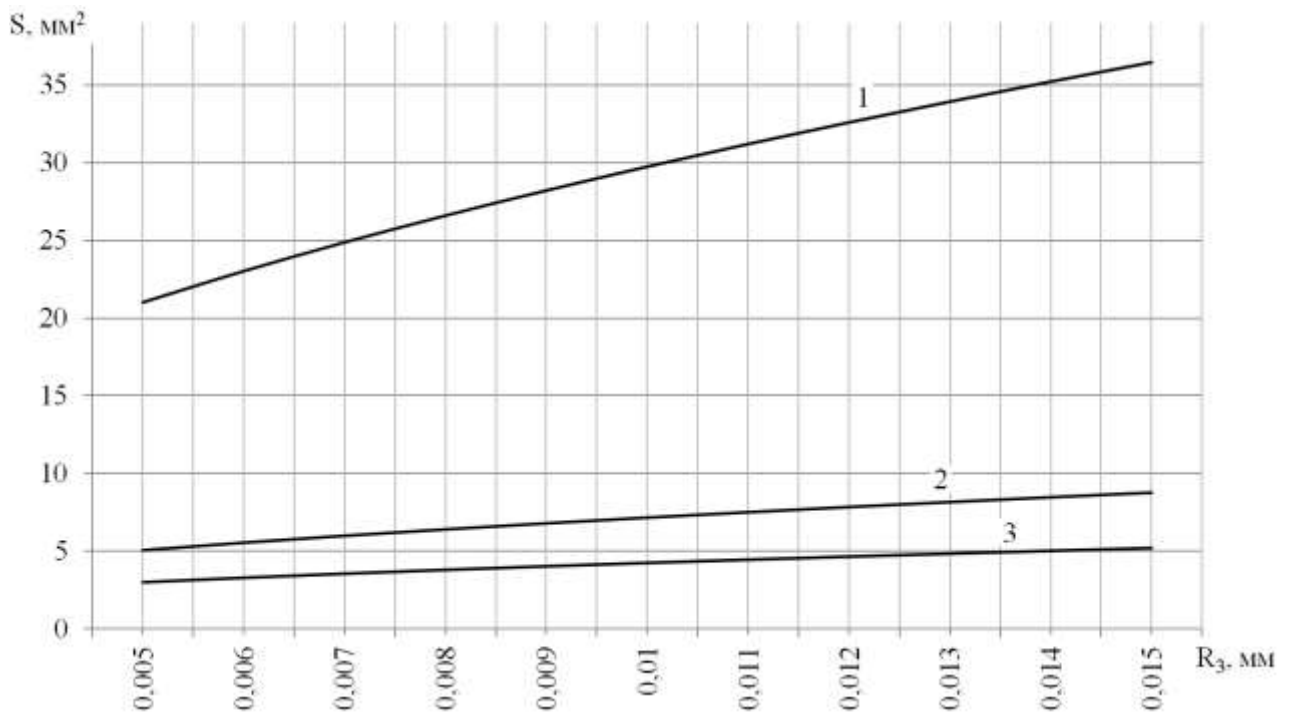


Рисунок 3.19 – Влияние величины МЭП (R_3) на площадь пятна контакта S при отношении диаметров ЭИ и обрабатываемого цилиндра (R_2/R_1) равным соответственно: кривая 1 – ($\frac{50}{49} = 0,98$); кривая 2 – ($\frac{50}{37} = 0,74$); кривая 3 – ($\frac{50}{25} = 0,5$). Толщина диска ЭИ t принята 1,5 мм

Согласно проведенным расчётам можно дать следующие рекомендации.

Работать ЭИ, диаметр которого не превышает 90% диаметра обрабатываемой поверхности цилиндра, на мягких режимах с малыми энергиями импульсов (здесь и далее под данными терминами подразумевается ЭИЛ при малых: силах тока короткого замыкания, емкости разрядного конденсатора, длительности импульсов). Диаметр инструмента не должен превышать 80% диаметра обрабатываемой поверхности при грубых режимах установки (энергия импульса $\geq 10^{-2}$ Дж).

Целесообразно проводить корректировку УП на протяжении всего цикла использования ЭИ согласно графикам, представленным на рисунке 3.19.

Не рекомендуется наносить покрытия с использованием траектории движения инструмента параллельно оси цилиндра (совмещать направления перемещения инструмента с осью цилиндра). Сплошность покрытия будет неравномерной по поверхности цилиндра (в разных секторах по поверхности цилиндра), от теоретически рассчитанной в начале обработки, до неудовлетворительной по мере износа ЭИ на конечных этапах легирования.

Не рекомендуется наносить покрытия с использованием радиальной траектории движения инструмента относительно оси цилиндра (последовательное кольцевое легирование поверхности от входной к глухой части цилиндра) с приращением вдоль оси цилиндра на размер толщины диска электрода инструмента t . Сплошность покрытия будет снижаться по мере того как ЭИ будет удаляться от входной части цилиндра.

Оптимальным следует считать спиралевидную (возвратно-поступательную) схему перемещения ЛЭ по цилиндрической поверхности.

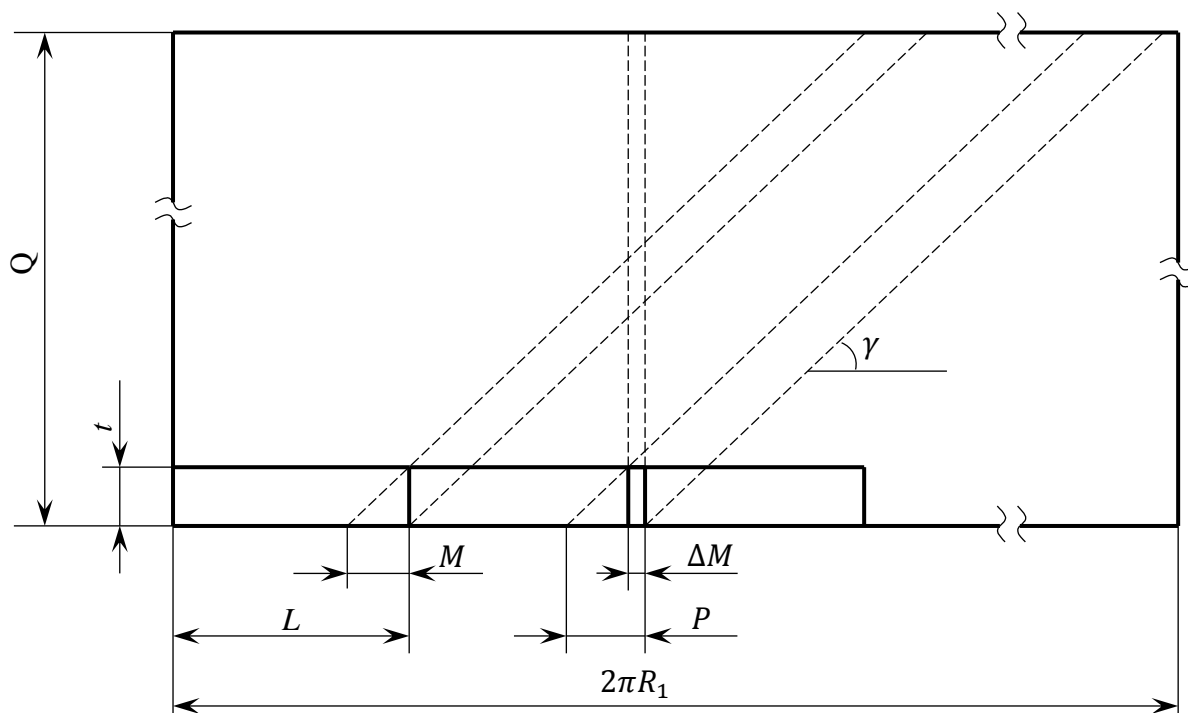


Рисунок 3.20 – Зоны перекрытия при траектории движения ЭИ по схеме возвратно-поступательной спирали

Данная траектория движения дискового ЭИ с заданным углом наклона спирали γ к оси легируемой цилиндрической поверхности, обеспечивает взаимное перекрытие легируемых участков (рис. 3.20).

За одну операцию обработки цилиндрической поверхности (представляющую собой площадь прямоугольника со сторонами $Q \times 2\pi R_1$), без смены ЭИ и корректировки как

параметров, так и самой структуры УП, угол наклона γ возвратно-поступательной траектории движения инструмента должен обеспечить необходимое перекрытие полос. При этом чрезмерное уменьшение значений угла наклона γ приведёт к необоснованному завышению общего времени обработки поверхности. Увеличение значений угла наклона γ может привести к недостаточному перекрытию полос, и как следствие, повышенной вероятности появления непролегируемых участков в силу различных факторов. Так интенсивный износ дискового ЭИ приведет к резкому снижению площадь пятна контакта S с легируемой поверхностью (рис. 3.18).

Представим перекрытие полос от перемещения инструмента параметром M таким образом, что:

$$L - L_{\text{изн}} \geq \frac{M}{2},$$

где $L_{\text{изн}}$ – теоретически достижимая длина дуги $(B_1B'_1)$ от изношенного ЭИ (на завершающих этапах обработки).

На практике, для исключения возможности появления непролегируемых участков, общую зону перекрытия P назначают:

$$P = M + \Delta M,$$

где ΔM – дополнительная зона перекрытия траектории движения ЭИ.

Таким образом, исключается необходимость корректировать УП в процессе операции нанесения покрытия ЭИЛ на поверхность цилиндра. При этом разница в сплошности и толщине покрытия на первых и последних минутах обработки незначительна.

Выводы по главе 3

Представлены результаты моделирования процесса ЭИЛ:

1. Разработана феноменологическая модель формирования ЛС, которая позволяет прогнозировать его элементный состав в зависимости от режимов обработки и физико-химических свойств материалов электродов.

На основе полученных данных можно прогнозировать поведение материала в МЭП, формирование ЛС, строить сложные зависимости распределения элементного состава ЛС по глубине.

2. Выполнено моделирование воздействия высококонцентрированного точечного источника тепла (единичный искровой разряд) на поверхность тонкостенного элемента.

Сделан вывод, что образцы с предварительно созданными растягивающими напряжениями после легирувания и разневоливания имеют минимальные растягивающие

напряжения на поверхности, а остаточные напряжения сжатия наиболее равномерно распределены по всей глубине пластины.

3. Рассмотрены особенности обеспечения равномерности упрочнения при использовании дискового электрода.

Показано, что оптимальной является спиралевидная (возвратно-поступательная) траектория движения инструмента с углом наклона спирали, обеспечивающим взаимное перекрытие полос упрочненного материала.

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ НА СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

4.1. Экспериментальные исследования формирования ЛС и массопереноса между сопряженными электродами

Состав и свойства получаемых покрытий зависят от материала ЛЭ, технологических параметров, воздействия внешней среды на процесс легирования. Влияние основных показателей и режимов обработки в виде графических зависимостей и диаграмм на производительность и качество поверхностного слоя представлено применительно к электроэрозионной обработке [112, 70, 96, 60] и применительно к ЭИЛ [8, 107, 72, 77, 69, 73]. Анализ источников позволяет предполагать о схожести формирования характерных зон поверхностного слоя от воздействия единичного разряда у данных процессов. Что позволит более разносторонне подойти к изучению интересующих явлений.

В случае ЭИЛ, формируемый наплавленный или модифицированный слой, характеризуется структурой, составом и физико-химическими свойствами. На характеристики такого покрытия влияют материалы, используемые как в процессе обработки (подложка из мягкого поверхностно-активного материала *Cu, Pb, Sn, Zn*) так и на завершающей стадии (верхний слой из жаростойкого или коррозионностойкого материала *Ni, Cr, W, Mo, V, Al*).

При легировании поверхностей основное значение уделяется физико-химическому составу и структуре электрода, составу межэлектродной среды [27] (возможности протекания химических реакций с выделением энергии и образованием новых веществ и структур), а также металлургической совместимости используемых материалов электрода и детали (образование твердых растворов, а также интерметаллидных соединений). Так материалы электродов с достаточно высокой степенью ионизации в условиях диэлектрической среды не могут обеспечить качественного покрытия, так же как и материалы с большей электропроводностью будут неэффективно переноситься по отношению к сопряженному электроду из материала с низкой электропроводностью [31].

Для обеспечения требуемых функциональных свойств покрытий при легировании используют материалы электродов, а также их соединений:

– твердосплавные материалы на основе карбидных групп: вольфрамовой, титано-вольфрамовой, титано-тантало-вольфрамовой (ВК3, ВК6-М, ВК20, Т15К6, Т30К4, ТТ20К9, ТТ10К8Б и др.)

– керметы а также их составляющие. Композициями металлов или сплавов с одной или несколькими керамическими фазами являются структуры типа $TiN-Ti, WC-Co, TiB_2-Ti, TiC-Ni, Al_2O_3-Ni$ и др. Керамическими фазами данных структур могут быть окислы ($Al_2O_3, Cr_2O_3, SiO_2, ZrO_2$), карбиды (SiC, Cr_3C_2, TiC), бориды (Cr_2B_2, TiB_2, ZrB_2), силициды ($MoSi$) и нитриды (TiN). В качестве металлических составляющих служат – $Cr, Ni, Al, Fe, Co, Ti, Zr$ и сплавы на их основе. Высокий перенос на упрочняемую поверхность а также плотные покрытия обеспечиваются NbC, TiC . В керметы могут входить добавки веществ и металлов обеспечивающие стабилизацию электроискрового процесса, оказывающие флюсующее воздействие.

- различные металлы, а также сплавы на их основе;
- графит, кремний, германий и другие полупроводниковые материалы.

В целях экономии дорогостоящих тугоплавких сплавов ВК и ТК в качестве материалов для ЛЭ предлагается использовать природно-легированные порошковые материалы [101]. Шеелитовый, датолитовый и бадделитовый порошковые материалы, а также материалы, полученные при первичной переработке шеелитового концентрата ильменита методом алюминотермии, значительно снижают стоимость производства материалов электродов.

Рассмотрим наиболее важные факторы, влияющие на перенос вещества между электродами, определяющие толщину наносимого ЛС, а также свойства формирующегося покрытия.

При взаимодействии электродов следует учитывать несколько механизмов переноса вещества между рабочими поверхностями. По уровню теплофизических свойств материалов, используемых для электродов, условно различают характерные теплофизическим свойствам группы [6].

Для тугоплавких материалов (характерны высокая температура плавления) перенос затруднителен, происходит в незначительных количествах с минимальными значениями по толщине ЛС рисунок 4.1. Характерными примерами служат легирующие компоненты, обеспечивающие коррозионную стойкость и износостойкость (W, Mo, V, Cr и др.) для различных марок сталей. Перенос материала будет происходить в основном по контактному механизму (при касании электродов). Однако при достаточной электроэрозионной стойкости упрочняющего материала, например легирование карбидами переходных металлов (WC, TaC, NbC , и др.), перенос на упрочняемую поверхность будет происходить по механизму напыления. Формируемый слой будет состоять из напыленных частиц, по составу близких к составу материала электрода.

В случае материалов с низкой температурой плавления перенос будет происходить преимущественно по механизму намазывания (рис. 4.2). При легировании электродами из

сплавов с компонентами различными по температуре плавления более теплостойкий компонент может выплавляться из электрода в виде частичек и переноситься с налипанием на упрочняемую поверхность.

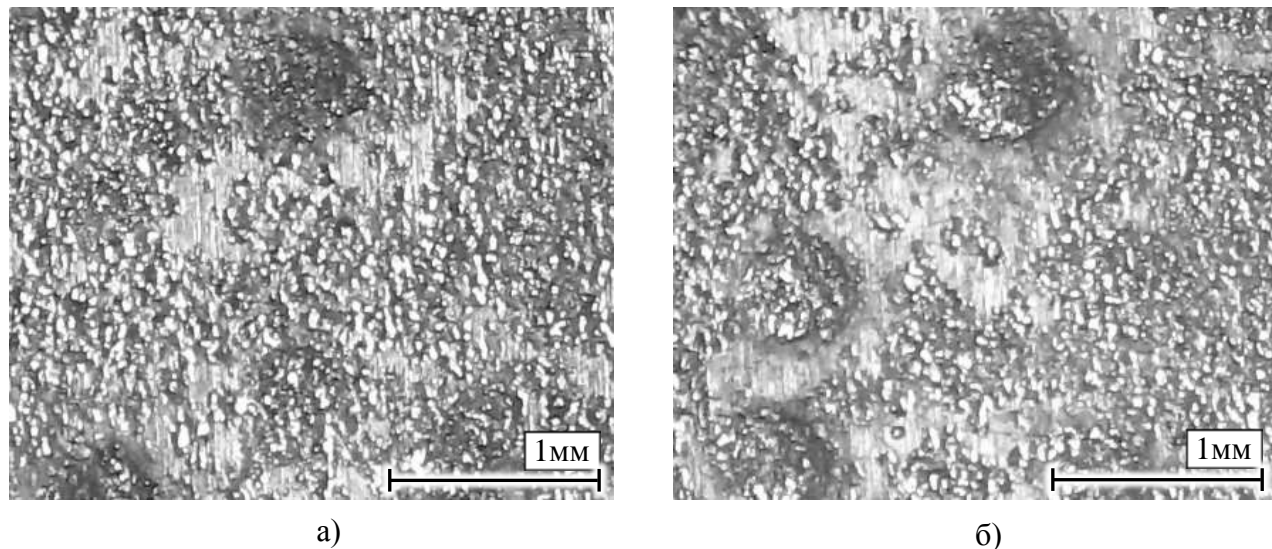


Рисунок 4.1 – Поверхность сплава ЭИ866 после ЭИЛ материалом СДП2. а) 50% перекрытие полос легирования. б) 40% перекрытие полос легирования

Здесь и далее условимся применять сокращенное написание режимов установки по следующей комбинации: последовательно, через точку с запятой, указываются ток короткого замыкания I_k (А), скважность q , длительность импульса напряжения t_{on} (мкс), емкость разрядного конденсатора C (мкф), скорость движения ЛЭ относительно упрочняемой поверхности $V_э$ (мм/мин), скорость вращения ЛЭ относительно упрочняемой поверхности $V_{э0}$ (об/мин) и время легирования единицы поверхности t_e (мин/мм²)

Приведенная выше запись (рис. 4.1) означает режим, при котором: $I_k = 16,0$ (А); $q = 10,0$; $t_{on} = 20,0$ (мкс); $C = 5,0$ (мкф); $V_э = 100,0$ (мм/мин). В краткой форме режимы установки при ЭИЛ запишем (16,0; 10,0; 20,0; 5,0; 100,0).

Основываясь на механизмах осаждения материала на упрочняемую поверхность сделаем заключение о качестве и сплошности ЛС. При ухудшении проводимости МЭП и как следствие массопереноса материала электрода на упрочняемую поверхность могут возникать прижоги, бугры, царапины электродом легируемой поверхности с вырывом частичек металла. Исследования показали, что в большинстве случаев добиться качественного слоя с хорошей сплошностью покрытия можно подбором режимов обработки, материалами подложки и ЛЭ, временем упрочнения единицы поверхности, шероховатостью исходной поверхности, склонностью формируемого материала к образованию дефектов и др. Так обработка, проведенная на мягких режимах, с малыми энергиями импульсов, обеспечивает более равномерные и сплошные покрытия.

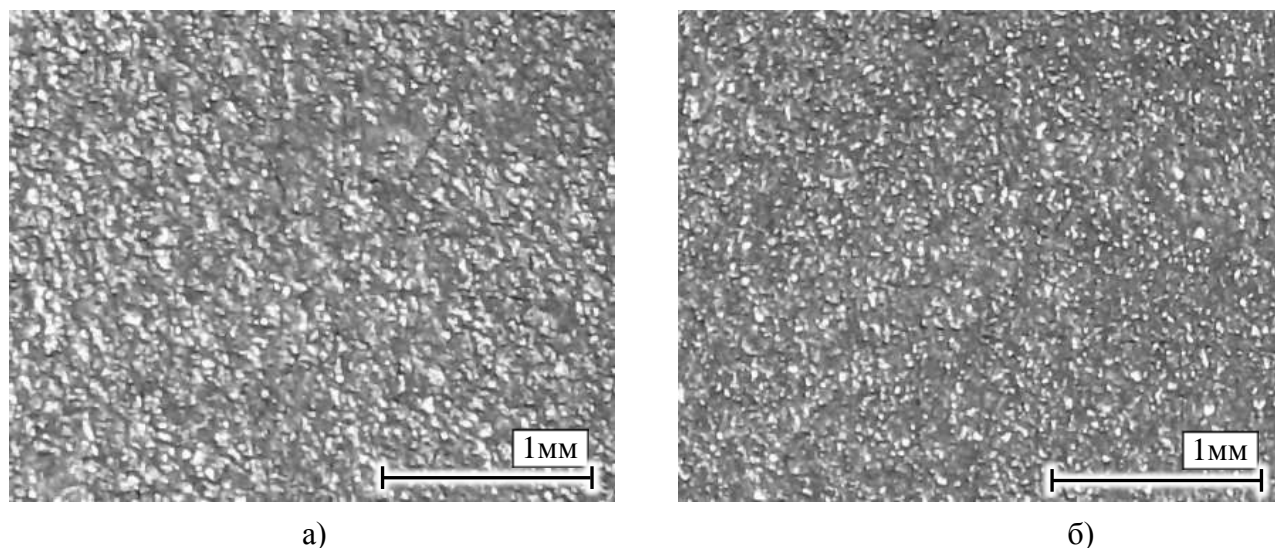


Рисунок 4.2 – Поверхность сплава ВТ20 после ЭИЛ материалом Al (а). Поверхность сплава ЭП866 после ЭИЛ последовательно электродами из материалов Nb, Cr, Al (б). Режимы установки при ЭИЛ (16,0; 10,0; 20,0; 5,0; 100,0)

В общем случае при легировании и эрозионной обработке часть процессов несет комплексный характер, непосредственно влияющих на формируемый слой. Строение упрочненного слоя, многими авторами представляется как совокупность зон, возникновение которых и определяется механизмом протекающих процессов. Учитывая сказанное, обработанную поверхность можно представить как материал, подвергшийся мгновенному точечному источнику нагрева до температуры плавления и испарения с последующей достаточно интенсивной кристаллизацией оставшейся, не выброшенной в диэлектрическую среду, части металла [39]. При достаточно длительных импульсах процесс идет более интенсивно с формированием более грубой поверхности, что в итоге приводит к образованию трещин термического характера, высокой шероховатости, неравномерному напряженному состоянию и формированию гетерогенной структуры поверхности [35].

Поверхность представляют в виде различных зон, в которых материал непосредственно или косвенно подвергся воздействию. Причем в большинстве случаев последовательность образования зон, их количество, структура и свойства зависят от рассмотренных выше условий обработки. Как правило, четкой разницы между зонами не наблюдается, в большинстве случаев они перекрывают друг друга (рис. 4.3).

Первая зона характеризуется непосредственно осажденным в паровой и жидкой фазах материалом электрода, расплавленным и перемешанным с материалом подложки. Оплавленный слой может содержать отдельные элементы внешней среды, диффундирующие в материал и приводящие к образованию новых структур и химических соединений.

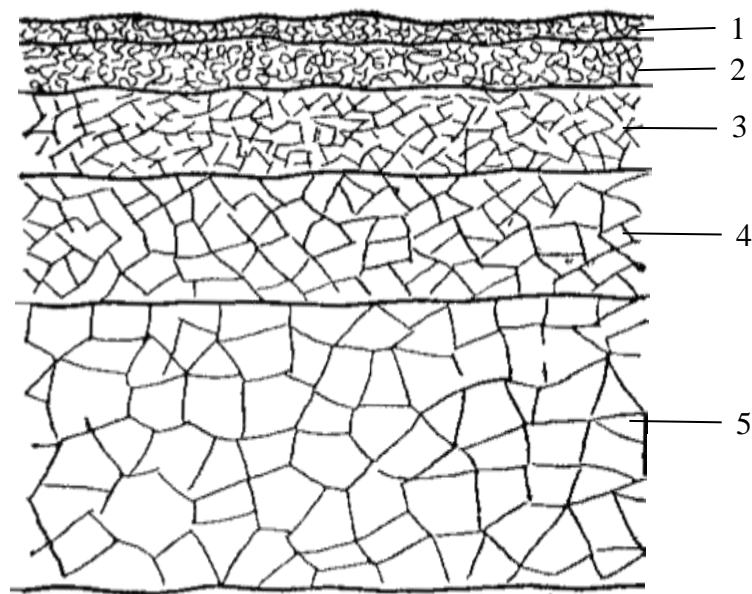


Рисунок 4.3 – Строение поверхностного слоя после ЭИЛ

Вторая зона представляет собой так называемый «белый слой» – материал, подвергшийся при высоких скоростях нагреву из жидкой фазы и последующей кристаллизации, как следствие деформированию под воздействием термических напряжений. Белый слой резко отличается по виду от остальной части поверхностного слоя, однако после термообработки (например, материала из углеродистой стали) резкая граница между ним и остальной частью поверхностного слоя исчезает, образуется переходная зона. В белом слое легко образуются сплавы компонентов обоих электродов, а также карбиды, окислы и другие элементы внешней среды. На толщину белого слоя влияет длительность и энергия импульса процесса обработки. Белый слой обладает высокой твердостью, износостойкостью, обладает высокой химической стойкостью.

Третья зона термического влияния обусловлена формированием соответствующих фазовых и структурных составляющих при нагреве и охлаждении приповерхностных объемов материала.

Четвертая зона пластической деформации подвергается воздействию волны напряжений от термодинамического и газодинамического воздействия, от электростатических и электромагнитных сил, а также структурных изменений и других факторов. Под их воздействием происходит пластическая деформация материала, выходящая за пределы зоны термического влияния. Зона пластической деформации характеризуется измельчением зерен, образованием больших дислокаций, а также изменением параметров решетки.

Так высокие скорости эрозии ЛЭ из Zr , Ti или Hf связаны со склонностью этих материалов к газонасыщению при тепловом воздействии электрических разрядов. В результате повышенное тепловыделение приводит к переносу по механизму намазывания расплавленного

металла на обрабатываемую поверхность. Это же характерно и для титановых сплавов, в больших количествах, поглощающих при нагреве кислород и азот воздуха [36].

Пятая зона представляет собой не подвергшийся воздействию материал подложки.

Влияние на массоперенос с анода на катод, и формирование оплавленного и упрочненного слоя оказывают вещества, вводимые в МЭП. Материалы, относящиеся к ряду веществ с низким потенциалом ионизации, могут увеличить тепловыделение и, соответственно, долю рабочих импульсов. Из-за многократного воздействия электрических разрядов, вызывающих диссоциацию и ионизацию межэлектродной среды, у анода происходят окислительные процессы, а у катода – восстановительные. Окисление анода приводит к формированию соединений, увеличивающих переходное сопротивление зоны газ – анод, что влечет увеличение тепловыделения и усиление полярного эффекта, т.е. большей эрозии анода по сравнению с катодом. В некоторых случаях удается в десятки раз увеличить перенос материала с анода на катод применением веществ, образующих на аноде соединения, обладающие меньшей проводимостью и сопротивлением электрической эрозии. Без введения таких веществ, перенос эрозионно-стойких материалов (медь, молибден, вольфрам и др.) очень мал, либо отсутствует вовсе. При использовании слюды, например, удается увеличить массоперенос в 10 и более раз. Стоит также учитывать возможность образования вредных компонентов, снижающих служебные свойства ЛС.

Немаловажное значение имеет возможность синтеза химических соединений из вводимых веществ и материалов сопряженных электродов с целью получения специальных свойств упрочненного слоя, например, антифрикционности. Эффективность применяемых веществ зависит от их химического взаимодействия с поверхностями электродов. В работе [144], применяя электроды из композиций $Ni - Al$ и $Ti - Al$, удавалось получить покрытия толщиной до 300 мкм в основном состоящей из керамической матрицы с вкраплением частичек алмаза размером от 8 до 250 мкм.

4.2. Топография и микрогеометрия упрочненных поверхностей

ЭИЛ представляет собой сложный процесс плавления и испарения материала подложки, перемешиванием в жидком состоянии с материалом электрода и, вследствие скоротечности процессов, мгновенной кристаллизацией сплава в таком состоянии на поверхности. Нижние слои формируемого покрытия (так называемая область материала закаленного из жидкой фазы) подвергаются рекристаллизации из-за температурного воздействия частичек расплавленного электрода и подложки и последующего их затвердевания. Условия, способствующие проникновению расплавленных частичек металла электрода в приповерхностные слои материала детали указывают на то, что получаемый модифицированный слой обладает высокой

диффузионной способностью к подложке. Адгезионные свойства получаемых покрытий обеспечивают устойчивое сцепление осажденного материала с подложкой под воздействием механических, знакопеременных циклических, асимметричных нагрузках, а также фрикционных воздействий, как на само покрытие, так и на модифицированный слой. Однако негативные (растягивающие) остаточные напряжения, формирующиеся в поверхностном слое материала после обработки, способствуют разрушению образцов при, такого рода, нагрузках. Данное явление может быть обусловлено разрастанием микротрещин, служащих концентраторами напряжений. Наличие микротрещин, усадочных микропаковин и других дефектов объясняется локальной термопластической передоформацией, подвергнутого плавлению и последующему быстрому охлаждению материала основы, а также структурным ростом и изменением размеров и формы зерна в процессе нанесения покрытий (рис. 4.4).

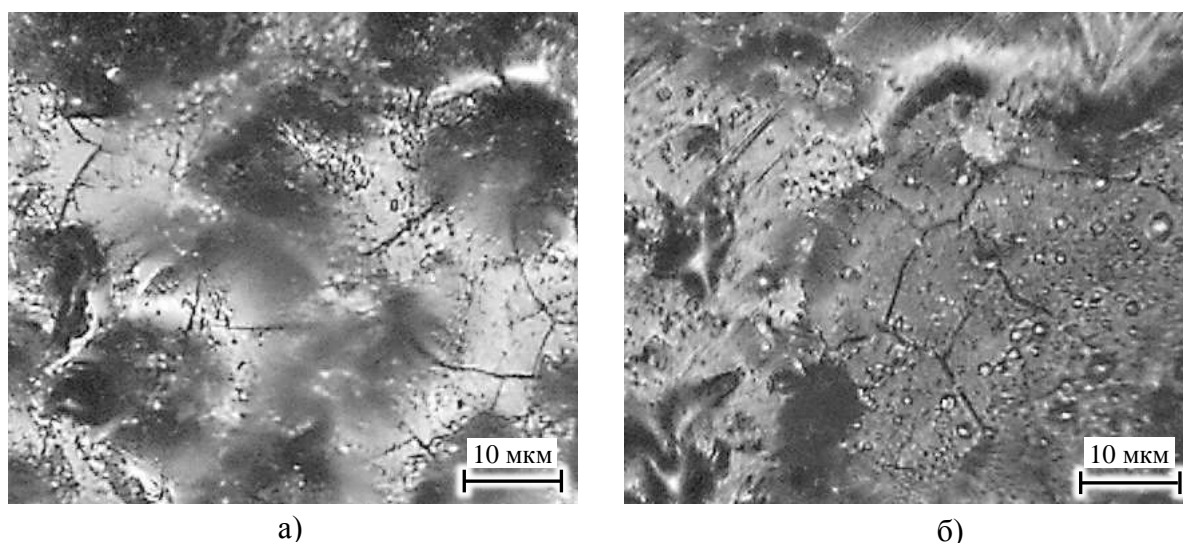


Рисунок 4.4 – Поверхности образцов из сплава ЭП866 после легирования. а) ЛЭ из Al.

б) двухслойное покрытие: ЛЭ из Ta – первый слой, ЛЭ из Ag – второй слой

Для улучшения эксплуатационных свойств получаемых покрытий применяются различные технологические решения. Так с целью залечивания микротрещин и релаксации негативных остаточных напряжений после легирования поверхность подвергают алмазному выглаживанию.

Из-за большей твердости упрочненных участков, а также возможными различиями по твердости областей самого участка (вызванных неравномерным осаждением и переносом более тугоплавких частичек, и перемешиванием осаждаемого материала), заглупление выглаживателя на исходном (не упрочненном) материале больше, чем на упрочненном. Соответственно большим является и пластическое оттеснение материала. В результате, после выглаживания формируется регулярный микрорельеф, выступы которого выполнены из материала большей твердости легированного материала [6].

После алмазного выглаживания предварительно легированных пластин знак остаточных напряжений меняется, т.е. появляются напряжения сжатия, причем их уровень практически не зависит от материала ЛЭ [105]. Наиболее высокий уровень сопротивления усталости получается при выглаживании мягких пластичных покрытий, что может быть объяснено лучшим "залечиванием" микротрещин [6].

В повышении эффективности процесса легирования существенных результатов можно добиться внешнем воздействием на процесс формирования слоя: нагревом или охлаждением изделия, наложением ультразвука, введением в МЭП веществ, влияющих на электроискровой процесс, комбинированием с высококонцентрированными источниками энергии и др.

Предварительно создаваемые положительные напряжения в образцах приводят к интенсификации процесса эрозии, а сжатие образцов во время легирования приводит к уменьшению эрозии [16]. ЭИЛ предварительно напряженных деталей представляет практический интерес для управления упругими свойствами тонкостенных деталей (мембран, поршневых колец, пружин и др.), а также формирование с необходимым знаком остаточных напряжений.

4.3. Влияние предварительного напряженного состояния на особенности формирования остаточных напряжений в поверхностном слое

Использование разнообразных материалов ЛЭ, протекание процессов формирования упрочненного слоя при высоких температурах и скоростях нагрева и охлаждения, создающих условия для синтеза высокопрочных соединений и закаливанию, открывают широкие возможности по управлению составом и свойствами легированного слоя, обеспечивают универсальность и широту технологических применений ЭИЛ. Одним из существенных факторов ограничивающих область применения ЭИЛ является образование в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений, микротрещин и других дефектов (рис. 4.4).

В данной главе рассматриваются вопросы влияния предварительно создаваемых сжимающих и растягивающих напряжений на состояние поверхностного слоя после ЭИЛ. Исследования представляют практический интерес для управления упругими свойствами тонкостенных деталей и деталей с регламентированной упругостью (мембран, поршневых колец, пружин и др.).

Формирование ЛС происходит в условиях высокоскоростного плавления и закалки, деформирования его термическими напряжениями и газодинамическими давлениями от электрического разряда. В результате чего образуется мелкодисперсная структура, сложного переменного состава, толщиной несколько десятков микрон. Для слоя характерна высокая

твёрдость, износостойкость, слабая и неравномерная травимость. Вследствие чего, наличие остаточных напряжений в образцах оценивалось по их величине прогиба.

Образцы в виде пластин из титанового сплава BT20 размером $60 \times 10 \times 0,8$ мм подвергались легированию ЛЭ из *Ag* и *W*.

Остаточные напряжения рассчитывались для трех схем установки пластин. Легирование происходило в специально изготовленных приспособлениях рисунок 4.6.

Первый тип образцов – пластины закреплялись на плоской поверхности (рис. 4.6, схема *a*); второй тип образцов – пластины изгибались в приспособлении для создания на легируемой поверхности растягивающих напряжений (рис. 4.6, схема *б*); третий тип образцов – на поверхности пластин создавались сжимающие напряжения (рис. 4.6, схема *в*).

Для второго и третьего типа образцов величина δ составляла 8 мм, что соответствовало максимальному изгибу образцов в области упругости.

Измерение величины прогиба после легирования и снятия пластин с приспособления выполнялось на инструментальном микроскопе ММИ-2. Топография поверхности изучалась на оснащённом цифровой камерой металлографическом микроскопе МИМ-7.

ЭИЛ выполнялось на установке с ЧПУ ELFA731 продольными и поперечными строками с шагом $h = 0,5$ мм. Шаг равен половине диаметра электрода, что обеспечивает перекрытие полос при легировании и получение равномерного покрытия, согласно рекомендациям из главы 3. Траектория перемещения электрода по обрабатываемой поверхности пластин представлена на рисунке 4.5.

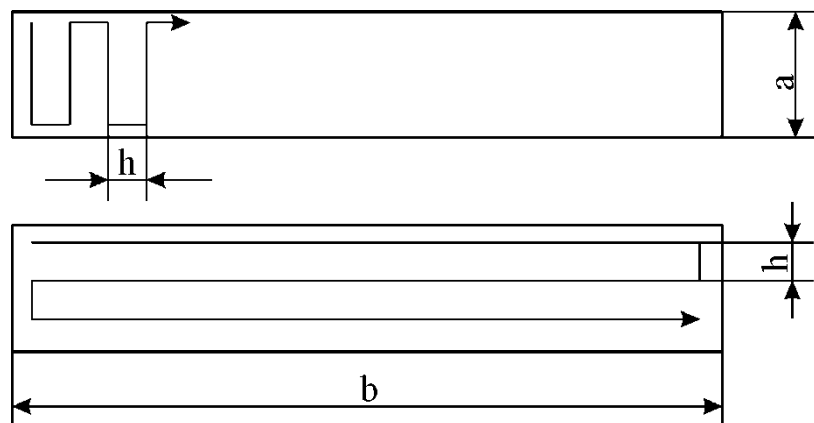


Рисунок 4.5 – Траектория перемещения электрода по легируемой поверхности пластин

Непосредственно перед и после испытания проводились замеры массы пластин, что позволяло оценить влияние режимов и схемы обработки на долю осаждённого или эродированного материала с легированной поверхности.

Взвешивание производилось на весах ВЛА-200г-М с точностью измерения 0,1 мг. Перед легированием пластина в целом и обрабатываемая поверхность протирались спиртовыми

салфетками для снятия жирового слоя и других видов загрязнений, под влиянием которых возможно изменение скорости и качества формируемого покрытия.

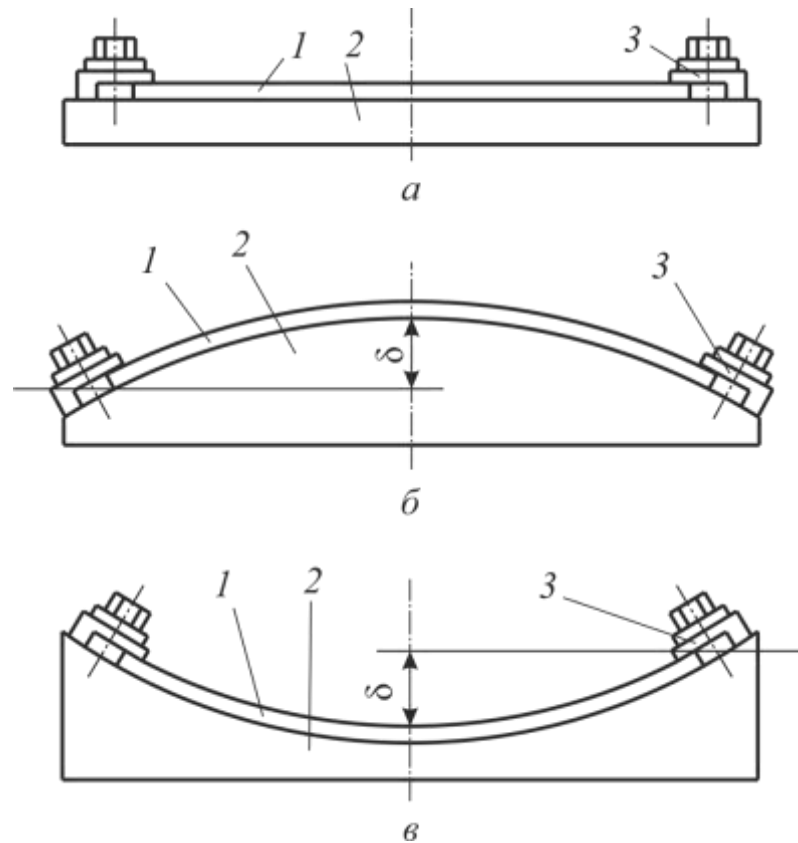


Рисунок 4.6 – Приспособления для крепления пластин по трем схемам: а) крепление пластины на приспособлении в нейтральном состоянии; б) создание на поверхности для легирования растягивающих напряжений; в) создание на поверхности для легирования сжимающих напряжений; 1 – образец; 2 – соответствующей формы основа; 3 – зажим

Образцы после легирования и разневоливания представлены на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7 – Образцы из VT20: а) первого, б) второго, в) третьего типов после ЭИЛ электродом из Ag (верхняя пластина) и W (нижняя пластина) соответственно

Измеренные величины прогиба пластин δ после снятия с приспособления представлены на рисунке 4.8.

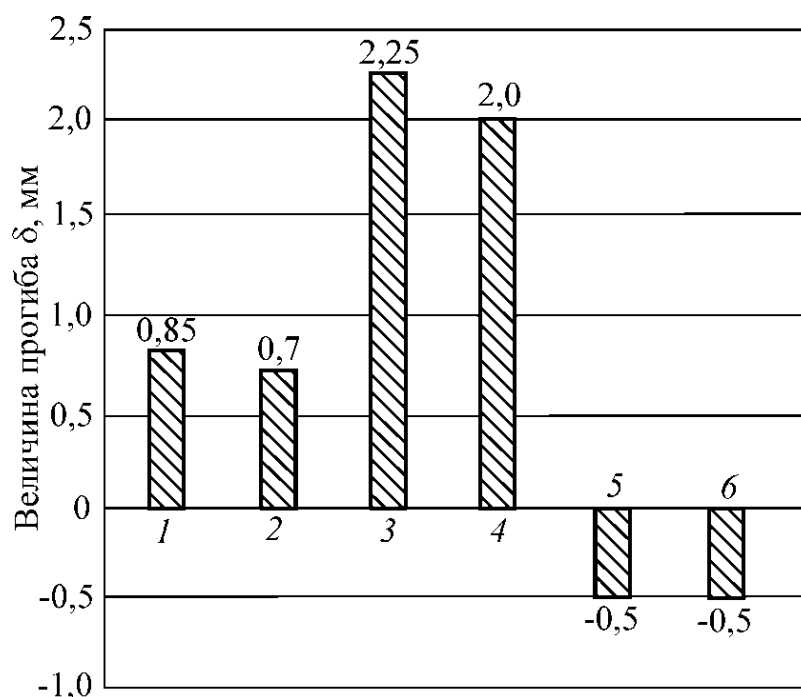


Рисунок 4.8 – Диаграмма прогиба образцов после легирования и разневоливания. Образцы №1 и №2 – первый тип, №5 и №6 – второй тип, №3 и №4 – третий тип

Для анализа полученных данных упростим исследуемую задачу и предположим, что образцы находятся в условия приближенных к рассматриваемым в источнике [5] – возникающие остаточные напряжения от ЛС заменим изгибающим моментом. Предполагается, что во всех случаях остаточные напряжения в поперечном сечении ЛС равны σ_T (предел текучести для титанового сплава ВТ20). Рассчитаем теоретическую толщину нанесенного ЛС (слоя подвергнутого температурному воздействию и создающего равнозначный по действию изгибающий момент) для $\sigma_T = 900$ МПа [95, 109] (условные значения для данного материала) и соответствующих экспериментам прогибов.

Сведения о механических свойствах титанового сплава ВТ20 приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Механические свойства титанового сплава ВТ20 в отожженном состоянии

Марка сплава	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,01}$, МПа	δ , %	ψ , %	a_n , Дж/см ²	$E \cdot 10^{-5}$, МПа
ВТ20 (Псевдо α - сплав)	950...1100	850...1050	750...950	10...15	25...45	50...70	1,20

Полученные значения прогиба пластин после легирования подставим в формулу 4.1.

$$\delta = \frac{4fEh^2}{3\sigma_T l^2} \quad (4.1)$$

где: h – толщина пластины; l – длина пластины; E – модуль упругости; δ – прогиб пластины в результате действия остаточных напряжений; f – толщина ЛС.

Результаты расчета теоретических толщин ЛС приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Теоретические толщины ЛС

Номер образца	4	3	6	2	7	8
Величина прогиба, мм	-0,5	-0,5	2,25	2	0,85	0,7
Толщина ЛС f , мкм	10	10	48,4	43	18,3	15

Средние значения остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}$ рассчитывались по полученным значениям прогибов пластин из условия, что толщина ЛС составила 10 мкм по формуле (4.2):

$$\sigma_{\text{ост}} = \frac{4\delta E h^2}{3f l^2} \quad (4.2)$$

Предварительное наведение растягивающих напряжений в приповерхностных объемах материала заготовки перед ЭИЛ позволяет снизить в покрытии напряжения растяжения. Напряжения сжатия распределяются по глубине упрочненного слоя сложным образом, о чем было рассмотрено в главе 3.

Величина остаточных напряжений, формирующихся при ЭИЛ, зависит от множества факторов, в том числе, величины усадки расплавленных объемов материала на поверхности связанных как с фазовыми превращениями, так эффектом термического расширения-сжатия [40].

На величину остаточных напряжений, возникающих при ЭИЛ, влияют технологические режимы (рис. 4.9) и материал ЛЭ (рис. 4.10).

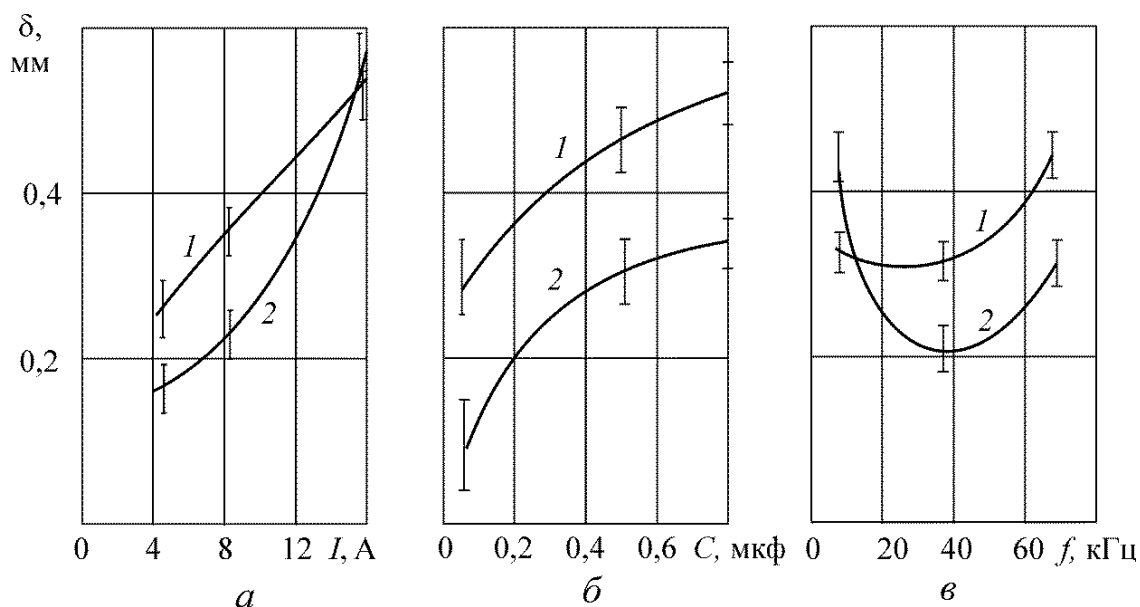


Рисунок 4.9 – Влияние режимов ЭИЛ на величину прогиба образцов: а) $f = 66$ кГц, $C = 0,47$ мкф; б) $f = 66$ кГц, $I = 11,2$ А; в) $I = 11,2$ А, $C = 0,47$ мкф. Кривая 1 – ЛЭ из ВК6-М.

Кривая 2 – ЛЭ из Al

Установлено, что остаточные напряжения растяжения увеличиваются с ростом параметров, от которых зависит энергия искровых разрядов (ток короткого замыкания I , емкость разрядного конденсатора C) и сложным образом зависят от частоты импульсов f . Многослойное легирование увеличивает уровень остаточных напряжений [32].

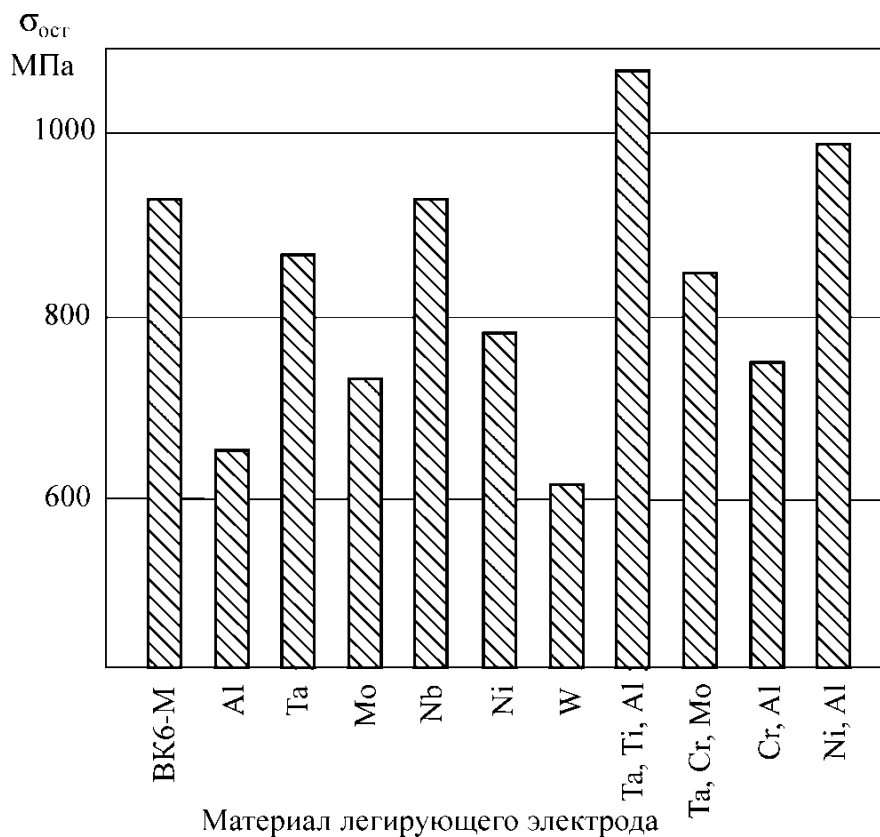


Рисунок 4.10 – Влияние материала ЛЭ на величину остаточных напряжений в поверхностном слое образцов

Во всех случаях имели место остаточные напряжения растяжения.

Проведенный после испытаний металлографический анализ показал наличие микротрещин, как на образцах первого типа, так и на образцах второго типа.

На поверхностях с покрытием из серебра количество и размеры микротрещин превышали аналогичные показатели для поверхностей с нанесенным вольфрамом (рис. 4.11). Причем образцы легированные более тугоплавким материалом (W) в экспериментах 2-го и 3-го типа сохранили большие по величине остаточные напряжения по сравнению с материалом Ag . Такой характер поведения можно объяснить более высоким температурным воздействием на подложку при легировании и соответственно большим объемом подвергшегося воздействию материала, а также более низкой пластичностью (механическими свойствами) образуемых новых компонентов материалов.

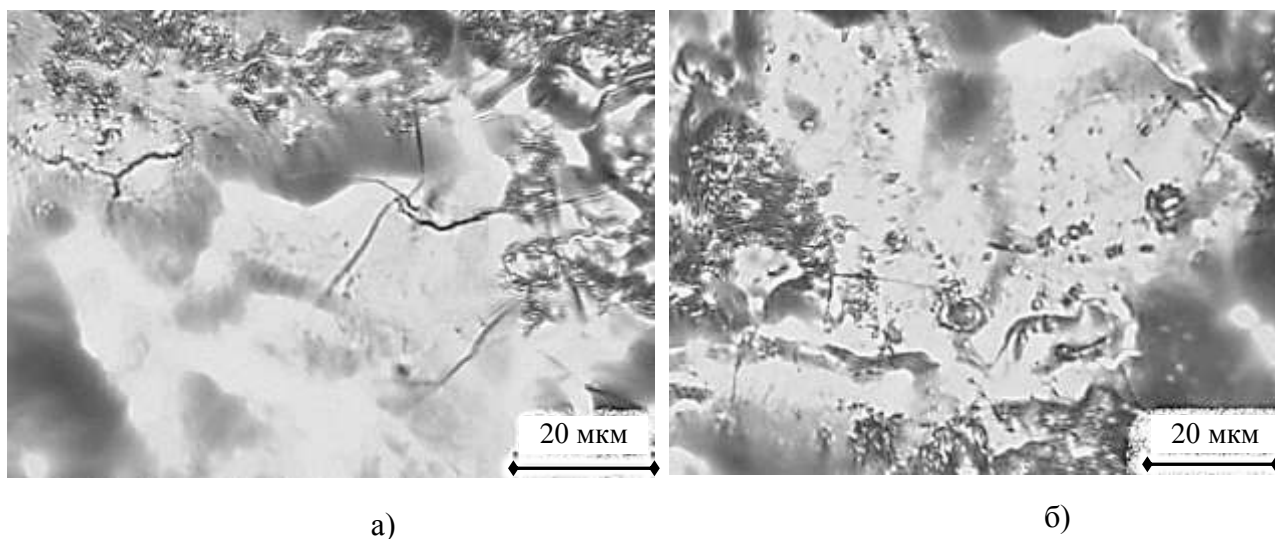


Рисунок 4.11 – Микротрещины на образцах первого типа, после легирования ЛЭ: а) *Ag*, б) *W*

Характерной особенностью для образцов, испытываемых с предварительным сжатием, является нормально ориентированные к оси изгиба и параллельные между собой расположения серий микротрещин на поверхности, легированной серебром (рис. 4.12).

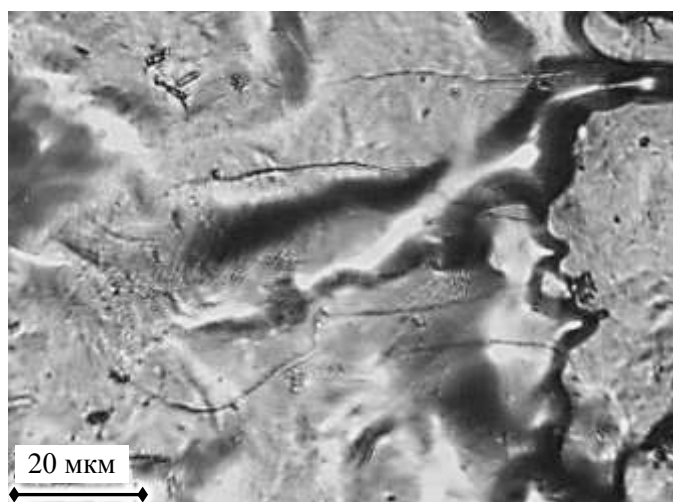


Рисунок 4.12 – Поверхность образца №2, с предварительно созданными сжимающими напряжениями, ЛЭ из *Ag*

При легировании ЛЭ из вольфрама похожей закономерности в расположении микротрещин не наблюдалось. Причиной тому может служить разница между теплофизическими характеристиками применяемых электродов. Как следствие, меньшая толщина нанесенного ЛЭ при более высокой твердости для вольфрама в сравнении с серебром. Также повышенное напряженное состояние приповерхностных (легированных) слоев после разневоливания. Более толстые покрытия почти всегда сопровождаются формированием внутренних напряжений, крупнозернистой структуры, увеличенной пористости.

4.4. Локальное карбооксидирование титановых сплавов

Одним из существенных недостатков титановых сплавов, ограничивающих их применение для деталей эксплуатируемых в условиях контактного нагружения, является их высокая склонность к схватыванию и задираобразованию при трении. Для обеспечения работоспособности деталей пар трения из титановых сплавов используют различные технологии нанесения покрытий и химико-термической обработки.

Высокая химическая активность титана, низкие теплопроводность и температуропроводность, меньший, чем у стали модуль упругости, объясняют необходимость создания на его поверхности защитных покрытий.

Титан и его сплавы обладают крайне низкими антифрикционными свойствами и сопротивлением изнашиванию. Тонкая пассивирующая пленка на его поверхности обладает низкой поверхностной энергией. Этим объясняется плохая адгезия к поверхности углеводородов и ПАВ. На ней крайне сложно адсорбируются молекулы жирных кислот, что является причиной невозможности применения большинства смазочных материалов для повышения антифрикционных характеристик изделий из титана.

В процессе контактного взаимодействия (трение, фреттинг) титан активно поглощает кислород воздуха, образуя с ним твердые растворы, упрочняющие зоны адгезионного контакта и приводя к вырывам металла [6].

Низкий уровень антифрикционных свойств и сопротивления изнашиванию титановых сплавов трудно повысить легированием металлами. Титановые сплавы обладают низким сопротивлением электрической эрозии, поэтому формирование ЛС протекает в условиях значительного переноса титанового сплава на ЛЭ, что снижает эрозию последнего. Для тугоплавких ЛЭ (*W*, *Ta*, *Mo* и др.) она крайне мала [Там же].

Тем не менее, при ЭИЛ наблюдается существенное увеличение контактной прочности и сопротивления изнашиванию, что связано с насыщением приповерхностных объемов титанового сплава газами воздуха при воздействии электрических разрядов. Материал ЛЭ играет меньшую роль, влияя на формирование оксидных и нитридных фаз, газонасыщение металла, вследствие изменения элементного состава ЛС. Характерно, что упрочнение достигается и при ЭИЛ ЛЭ из титана [Там же].

Ниже приводятся результаты исследований влияния ЭИЛ графитовыми электродами на состояние поверхностного слоя и сопротивление изнашиванию.

ЭИЛ выполнялось на установке ELFA731 стержневыми электродами из графита и дисковыми щеточными электродами, изготовленными из углеродного волокна [29].

Установлено, что при легировании электродами из углеродосодержащих материалов можно получить на титановых сплавах мелкодисперсные сплошные ЛС, сложного состава, толщиной 3...10 мкм с низкой шероховатостью, высокими антифрикционными свойствами и износостойкостью. В результате воздействия электрических разрядов протекающих между поверхностью и графитовым электродом на поверхности образуется слой сложного строения, представляющий собой перемешанный быстрозакаленный материал содержащий оксиды и карбиды титана и графитовые включения. Вследствие взаимодействия с окружающей средой (воздухом) этот слой насыщен кислородом, который, как известно, является сильным упрочнителем. В зависимости от технологических режимов и условий обработки можно в широком диапазоне регулировать толщину ЛС [33].

При больших энергиях импульсов формируется пористое покрытие с относительно высокой шероховатостью, в покрытиях наблюдаются сторонние включения.

При использовании импульсов с малой энергией образуется слой, имеющий мелкодисперсную сплошную структуру даже на поверхностях со сравнительно высокой шероховатостью (рис. 4.13). В зависимости от кратности воздействия разрядов на участок поверхности изменяется структура ЛС. Увеличивается количество графитовых включений, что проявляется в изменении цвета поверхности.

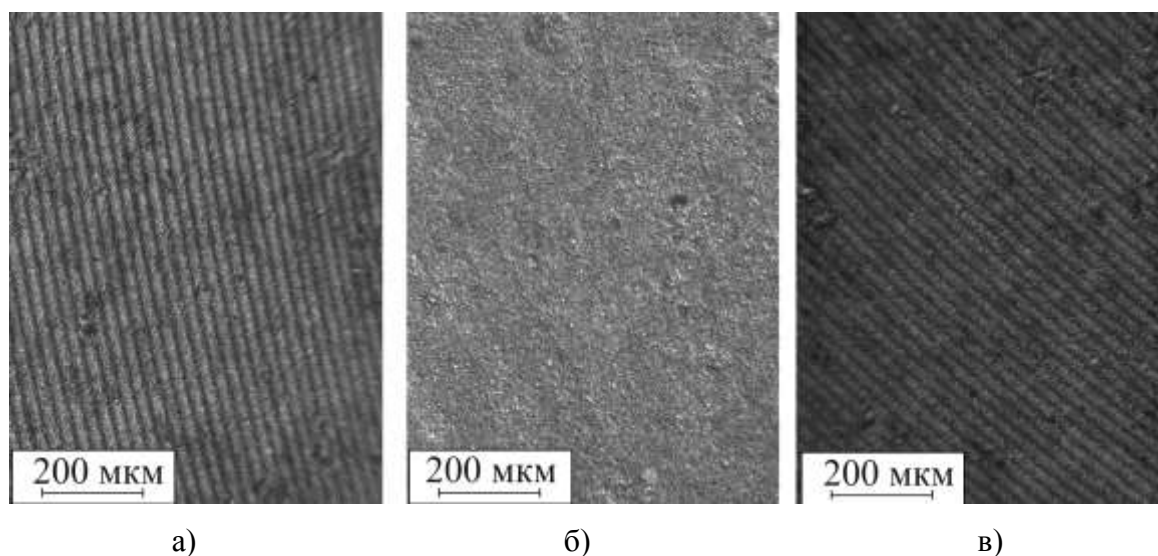


Рисунок 4.13 – Углеродосодержащие покрытия, нанесенные на поверхности образцов из сплава VT20. После чистового точения (а, в); после шлифования (б)

Для обеспечения требуемой шероховатости, повышения усталостной прочности и дополнительного упрочнения пористые покрытия допускается выглаживать без наличия смазки (поверхность обезжириванию не подвергается) и при предварительной обработке покрытия смазывающими веществами.

Было установлено, что выглаживание наконечником с радиусом рабочей части 2 мм позволяет снизить шероховатость поверхности с $Ra = 0,32 \dots 0,63$ мкм до $Ra = 0,1 \dots 0,25$ мкм (рис. 4.14–4.19).

Использование импульсов с высокой энергией формирует неоднородное покрытие: язвины с кавернами (кратерами), внутри которых собираются продукты разрушения электрода инструмента, последующее их выгорание (прижоги) и коксование; края кратеров и бугров на которых толщина покрытия минимальна, что может привести к возможному разрыву при выглаживании (рис. 4.15).

На минимальных энергиях импульсов при наличии глубокого дефекта на поверхности практически не выявляется её восстановление после ЭИЛ (залечивание) даже совместно с алмазным выглаживанием (рис. 4.14). Подробнее о технологических возможностях ЭИЛ по залечиванию поврежденных поверхностей будет рассмотрено в главе 5.

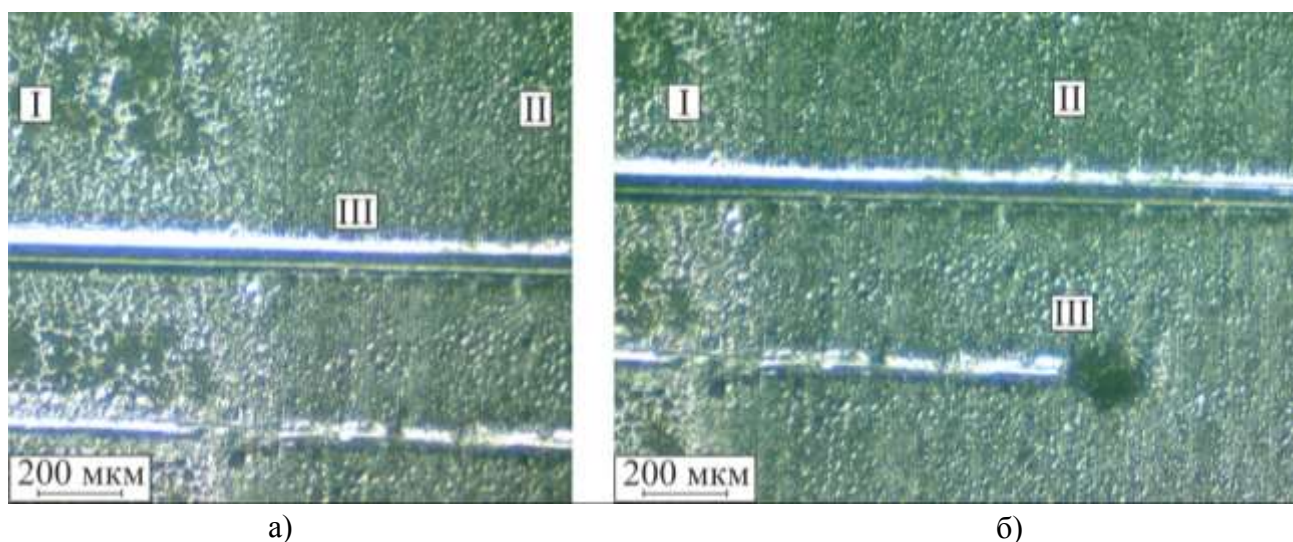


Рисунок 4.14 – Углеродосодержащие покрытия на образцах из VT20, полученное ЛЭ из графита с участками легированной (I), выглаженной по легированной (II) поверхности. Искусственно созданные царапины на поверхности до нанесения покрытия (III). а) граница легированной и выглаженной участков; б) зона взаимодействия индентора с царапиной

Отсутствие смазывающего вещества во время выглаживания индентором не приводит к задираобразованию (рис. 4.14, область III). В данном случае ЭИЛ выполнялось на следующих режимах: (6,4; 5,0; 3,0; 0,1; 40,0; 400,0). Выглаживание производилось со следующими параметрами: алмазный индентор имел радиус при вершине $R = 2,1$ мм; нагрузка на индентор 2,5 кг; скорость перемещения индентора по поверхности $V_{\text{инд}} = 450$ мм/мин. Выглаживание производилось с шагом 50 мкм.

Снижение частоты вращения ЭИ приводит к механическому образованию на его рабочей поверхности сколов, попаданию сколовшихся частичек в межэлектродное пространство и их

участие в образовании вторичных разрядов (паразитных разрядов), что снижает стабильность процесса (ухудшение работы следящей системы, снижение сканирующей способности электрода по поверхности образца). Вследствие чего образуются бугры, прижоги (рис. 4.14).

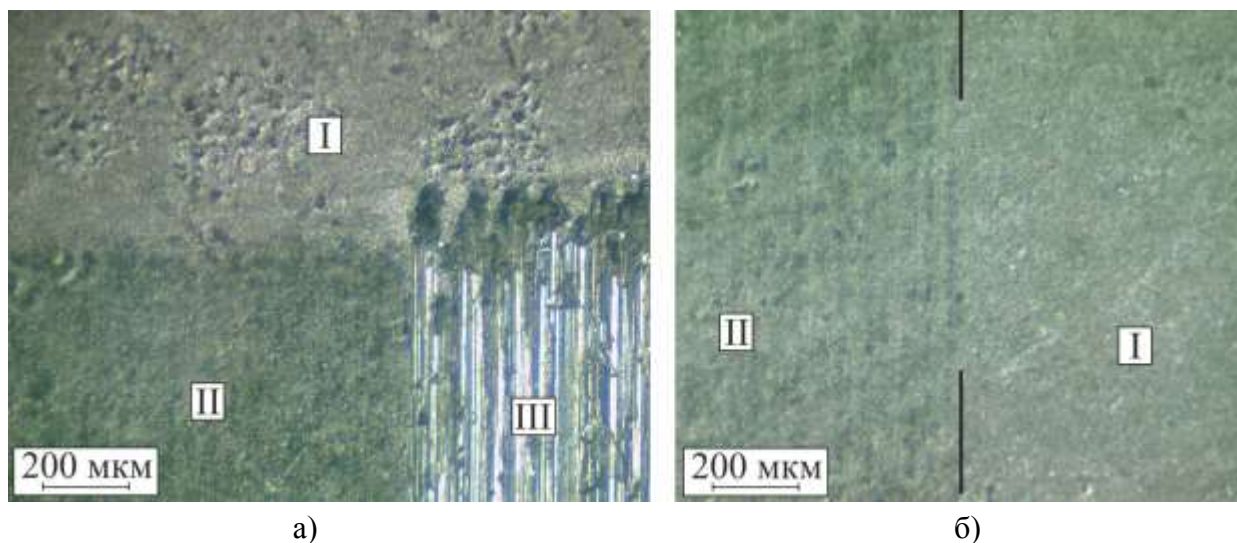


Рисунок 4.15 – Углеродосодержащие покрытия на образцах из VT20. Участки легированной (I), выглаженной по легированной (II) и выглаженной по легированной поверхности с имеющимся разрывом покрытия во время выглаживания (III). а) нагрузка на индентор 1,5 кг; б) нагрузка на индентор 1 кг; выглаженная и легированная области разделены черными линиями сверху и снизу

Обработка образцов на минимальных энергиях импульсов (минимальных значениях параметров генератора технологического тока установки) в совокупности с максимальной частотой вращения ЭИ формирует более равномерное покрытие (рис. 4.15). Для данных режимов (6,4; 5,0; 3,0; 0,1; 40,0; 4000,0) характерна лучшая сплошность, отсутствие прижогов, практически исключены нарушения в стабильности формирования покрытия. Выглаживание без смазки с нагрузкой 1,5 кг на индентор приводит к разрыву покрытия (рис. 4.15, а).

Максимальные режимы установки ЭИЛ (16,0; 10,0; 20,0; 1,0; 40,0; 2600,0) в совокупности с высокой частотой вращения ЭИ позволяют обеспечить удовлетворительную сплошность, стабильность параметров покрытия на протяжении всей операции легирования. Выглаживание производилось с указанными ранее параметрами, с нагрузкой 6 и 15 кг соответственно (рис. 4.16, а, б). Покрытие перед выглаживанием было обработано смазывающим веществом И20А.

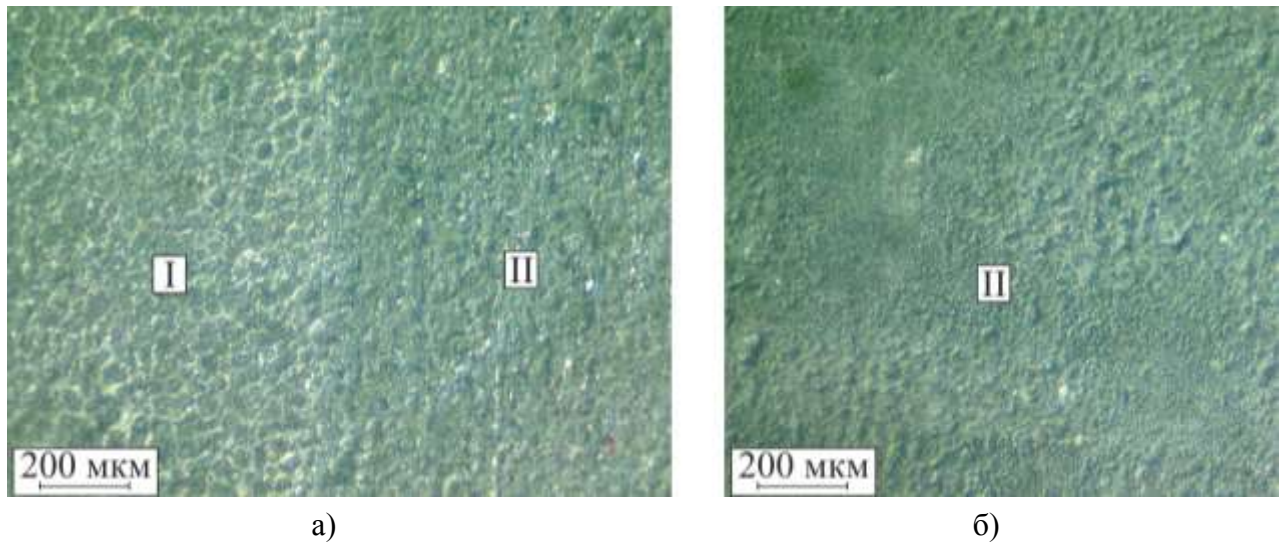


Рисунок 4.16 – Углеродосодержащие покрытия на образцах из ВТ20 с участками легированной (I) и выглаженной по легированной (II) поверхностей. а) нагрузка на индентор 6 кг; б) нагрузка на индентор 15 кг

Наличие смазывающего вещества позволяет производить выглаживание при максимальных нагрузках (свыше 15 кг) на индентор даже покрытий, полученных на минимальных режимах ЭИЛ, с наивысшей частотой вращения электрод-инструмента (4000 об/мин), о чем будет подробно рассмотрено в главе 5.

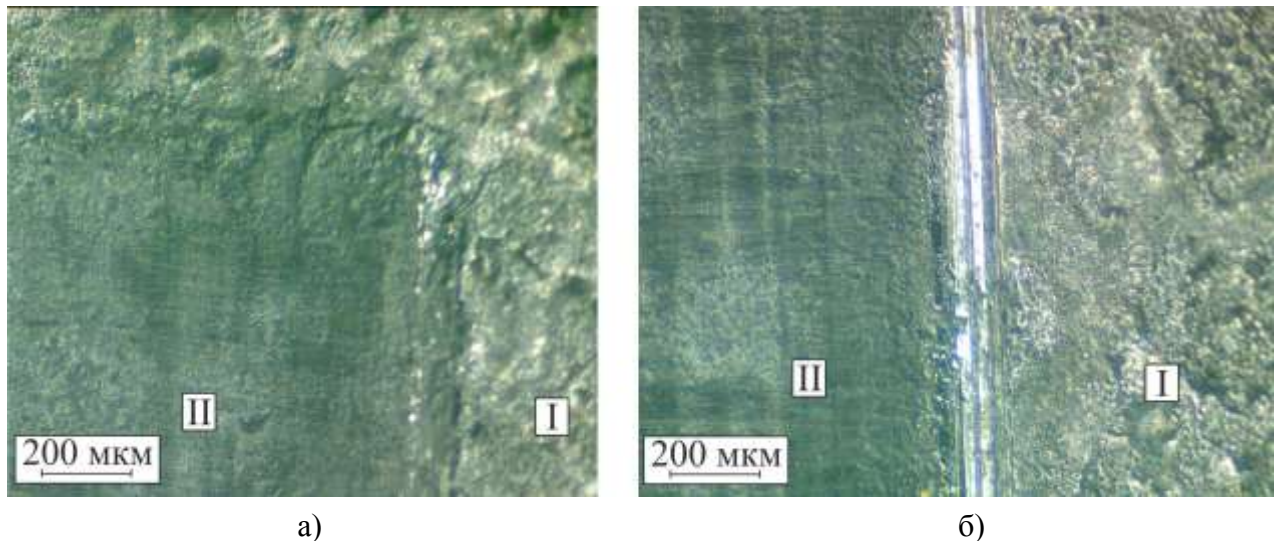


Рисунок 4.17 – Углеродосодержащие покрытия на образцах из ВТ20 с участками легированной (I) и выглаженной по легированной (II) поверхностей. Нагрузка на индентор 30 кг. а) участок смены траектории движения индентора; б) зарождение зоны разрыва покрытия

Превышение нагрузки на индентор свыше 27 кг приводит к существенным пластическим передеформациям, изменениям поверхностного слоя и, как следствие, структуры покрытия (рис. 4.17). Режимы установки ЭИЛ (16,0; 10,0; 20,0; 1,0; 40,0; 2600,0). Выглаживание

производилось с указанными ранее параметрами, нагрузка на индентор составила 30 кг, индентор имел радиус при вершине $R = 2,5$ мм.

Увеличение числа проходов ЭИ по легируемому участку (времени легирования единицы поверхности t_e) приводит к деградации поверхности покрытия. Причем повышение энергии импульсов не улучшает качества покрытия (рис. 4.18).

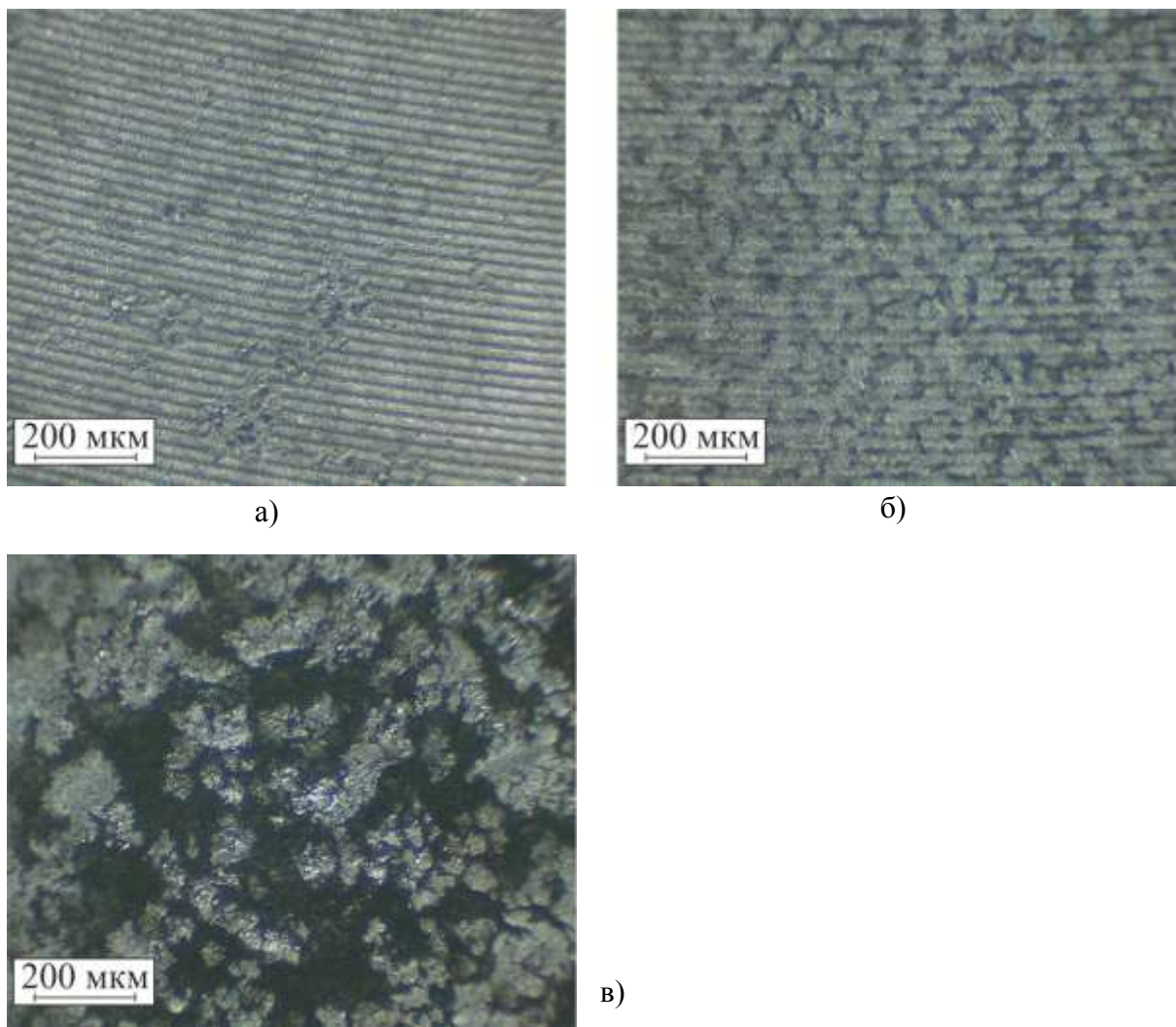


Рисунок 4.18 – Углеродосодержащие покрытия на образцах из VT20 со следующими режимами.

Покрытия, представленные на рисунке 4.18, получали на следующих режимах:

(6,4; 5,0; 3,0; 0,1; 100,0; 2600,0; 0,0255) – рисунок 4.18, а;

(6,4; 5,0; 3,0; 0,1; 100,0; 4000,0; 0,102) – рисунок 4.18, б;

(16,0; 10,0; 20,0; 1,0; 100,0; 4000,0; 0,815) – рисунок 4.18, в.

Снижение t_e на максимальных режимах ЭИЛ незначительно улучшает качество поверхностного слоя (рис. 4.19).

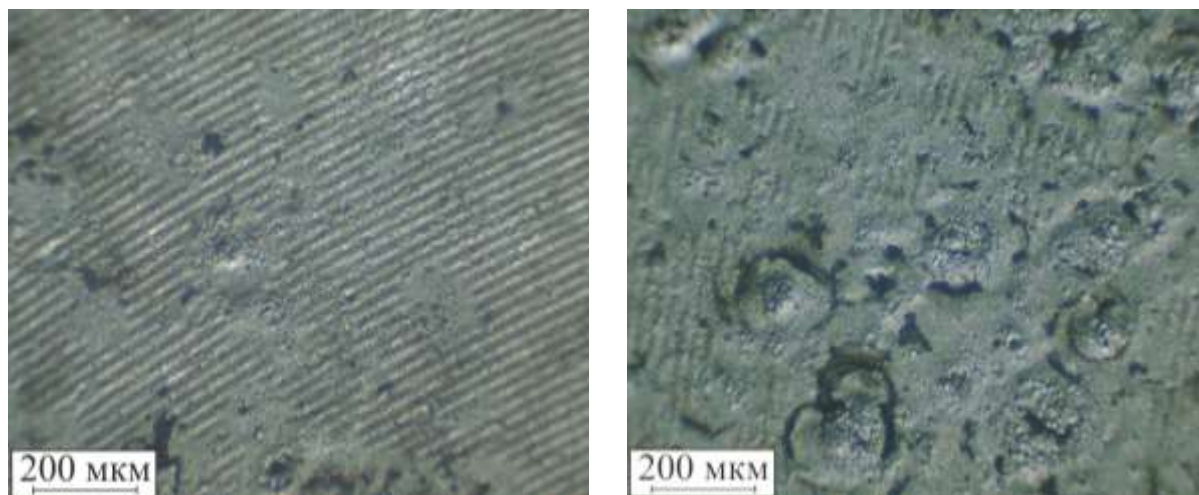


Рисунок 4.19 – Углеродосодержащие покрытия на образцах из VT20

Покрытия, представленные на рисунке 4.18, получали на следующих режимах:

(16,0; 10,0; 20,0; 1,0; 100,0; 4000,0; 0,0255) – рисунок 4.19, а;

(16,0; 10,0; 20,0; 1,0; 100,0; 0,102) – рисунок 4.19, б.

Экспресс испытания на износ, выполненные в условиях скольжения алмазного сферического индентора по упрочненной поверхности показали высокую прочность и износостойкость покрытия. После нескольких циклов скольжения на поверхности наблюдается приработанный слой с характерным графитовым отблеском, выдерживающий весь цикл испытаний (рис. 4.20).

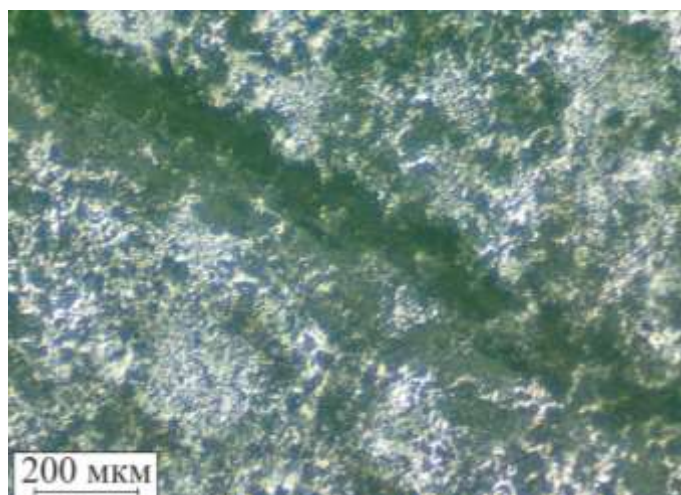


Рисунок 4.20 – Экспресс испытания на износ, выполненные в условиях скольжения алмазного сферического индентора по легированной поверхности

Экспресс-оценка антифрикционных свойств упрочненных поверхностей выполнялась в условиях плоского кольцевого контакта на маятниковом трибометре. На рис. 4.21 представлены легированные поверхности после испытаний с характерным фреттингом.

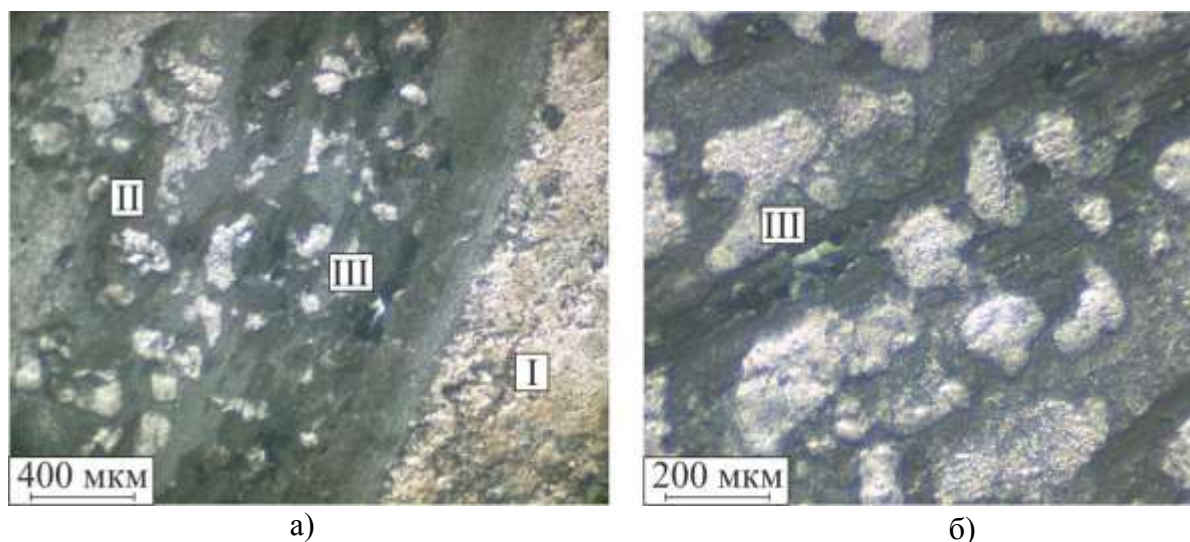


Рисунок 4.21 – Экспресс-оценка антифрикционных свойств упрочненных поверхностей с участками легированной (I), после испытаний (II) поверхностей. Область формирования пленки после фреттинга (III). а) граница легированной и после испытаний поверхностей; б) участок образования фреттинг-износа

Перспективной заменой алмазного выглаживания и получения низкой шероховатости поверхности при достаточно высоких исходных параметрах служит обкатка ЛС роликами (шарами) [80, 81]. Была проведена серия сравнительных испытаний на образцах из материала ВТ20, с нанесенным ЛКО покрытием по рассмотренной выше методике (рис. 4.22). На основе полученных результатов было сделано заключение о целесообразности применения данного метода.



Рисунок 4.22 – Процесс обкатки ЛКО покрытия на образце ВТ20 роликом из закаленной стали

При исходных значениях шероховатости поверхности образца ($R_a = 0,98$ мкм), производилось легирование на режимах с минимальной энергией импульсов (после ЛКО шероховатость менялась незначительно). В дальнейшем выполнялась обкатка поверхности роликом из закаленной стали, представляющим собой диск диаметром 14,0 мм и толщиной

1,5 мм. Боковая сторона диска скруглена радиусом 1,8 мм, для исключения возможности прорезать деформируемую поверхность острыми кромками.

В результате удавалось снизить шероховатость покрытия в два с половиной раза, получив значения $Ra = 0,38$ мкм. При этом наблюдается снижение параметра шероховатости с увеличением удельного усилия обкатывания до определенных предельных значений, превышение которых приводит к разрушению покрытия и выдавливанию чистого материала подложки в виде прожилок в на стыках разрушенного легированного слоя. На образцах с ЛКО покрытием, полученным на минимальных режимах установки, во время обкатывания с нагрузкой свыше 35 кг обнаруживаются участки с разрушением покрытия (металлическим отблеском) в виде строчек параллельных траектории обкатывания поверхности роликом (рис. 4.23, б).

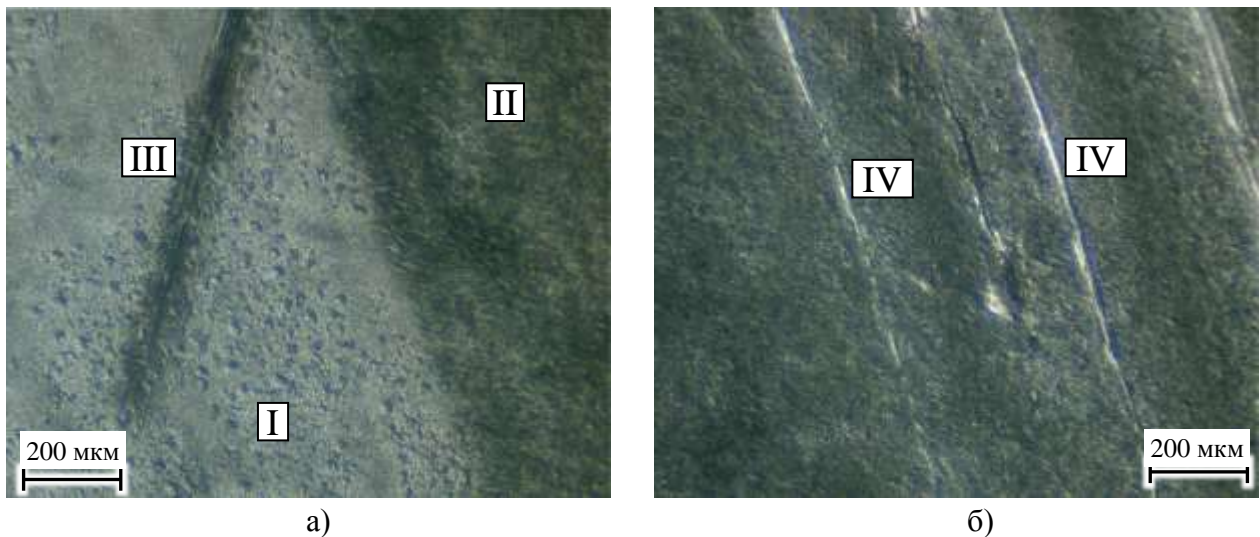


Рисунок 4.23 – Углеродосодержащее покрытие на образцах VT20 выполненное на режиме с минимальной энергией импульсов и последующей раскаткой роликом с усилием: а) 7,5 кг; б) 37,5 кг. Участки разрушения покрытия (IV)

Учитывая изложенный ранее материал, а также рекомендации в работах [80, 81] можно предположить, что замена алмазного выглаживания на обкатку роликами (шариками) позволит расширить рабочие диапазоны как ЛКО, так и последующие операции поверхностно пластического деформирования.

Выводы по главе 4

1. Проведены металлографические исследования формирования ЛС, экспериментальные исследования массопереноса между сопряженными электродами. Изучена топография и микрогеометрия упрочненных поверхностей.

Установлено, что остаточные напряжения растяжения увеличиваются с ростом тока короткого замыкания I , емкости разрядного конденсатора C , и сложным образом зависят от частоты импульсов f . Многослойное легирование увеличивает уровень остаточных напряжений.

2. Экспериментально установлено, что предварительное наведение растягивающих напряжений в приповерхностных объемах материала заготовки перед ЭИЛ позволяет получить в покрытии напряжения сжатия.

3. Установлено, что комплексное применение ЛКО и поверхностно-пластического деформирования позволяют в два-три раза повысить износостойкость рабочих поверхностей деталей из титановых сплавов.

ГЛАВА 5. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ И ЛЕГИРОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ ГТД, ИХ АГРЕГАТОВ, ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕРДАЦИИ

5.1. Сфера применения ЭИЛ и комбинированных методов на его основе для повышения эксплуатационных свойств и восстановления деталей ГТД

Представленные ранее технологические методы упрочнения поверхностного слоя направлены на повышение служебных свойств деталей различного назначения. Условия эксплуатации таких деталей носит характер контактного нагружения. Номенклатура деталей продиктована технологическими возможностями оборудования для ЭИЛ. При необходимости, целесообразна модернизация оборудования с учетом различного назначения, исходя из потребностей машиностроительных предприятий.

Учитывая особенности процесса нанесения износостойких покрытий, а также реализацию данного метода совместно с комбинированным упрочнением, детали подверженные ЭИЛ условно можно разделить на четыре типа:

1. детали, содержащие как внутренние, так и наружные цилиндрические или конические поверхности;
2. детали, содержащие внутренние отверстия малого диаметра;
3. детали, содержащие сферические или сложные фасонные наружные или внутренние поверхности;
4. детали с подлежащими упрочнению плоскими поверхностями.

Данные детали эксплуатируются в условиях различных по характеру действующих нагрузок, различным по величине температурным режимам, периодам смазывания, особенностями взаимодействия с поверхностью ответной детали и т.д. [6]

Для выяснения технического состояния деталей и определения их пригодности к дальнейшей работе или возможности их ремонта и восстановления проводят их дефектацию [100].

В указаниях по дефектации приняты следующие наименования дефектов: царапины и риски, надиры, следы наклепа, вымывание материала, молекулярное схватывание, выкрашивание, засветление, вмятины.

По конструкции и условиям эксплуатации детали при дефектации условно можно разделить на три основные группы [Там же]:

1. детали, подвергающиеся износу в процессе работы агрегата (золотниковые и плунжерные пары, подшипники, валики, зубчатые колеса и т.д.)
2. неподвижные детали (корпуса и крышки)
3. штуцера, пробки, пружины и крепежные детали (болты, гайки, шайбы)

Износ поверхностей деталей может происходить по различным механизмам (абразивный, усталостный, окислительный, фреттинг-коррозия и др.). Возможно задиорообразование и заклинивание подвижных сопряжений.

В авиаремонтном производстве нашли применение следующие способы получения покрытий: химический, электрохимический с катодным восстановлением металла (гальванический), электрохимический с анодным окислением металла (анодирование, окисление), диффузионный, металлизационный, контактно-механический и др. [75]

Перед покрытием необходимо проводить тщательную подготовку поверхности. В качестве подготовительных операций применяют механическую и термическую обработку, обезжиривание и травление. Цель подготовительных операций является удаление с поверхности загрязнений, окислов, остатков покрытий, окалина, придание поверхности нужного класса шероховатости, удаление механических повреждений, снятие эксплуатационных напряжений в поверхностном слое. [Там же]

Для упрочнения некоторых из этих деталей применимо ЭИЛ без комбинирования с другими способами упрочнения и отделочной обработки. Если же по техническим условиям требуется шероховатость ниже $R_a = 0,8$ мкм, или предъявляются дополнительные требования по усталостной прочности – деталь подлежит комбинированной обработке. Поскольку микрогеометрия поверхностей после ЭИЛ способствует сильному изнашиванию сопряженной детали, а процесс приработки из-за высокой твердости имеет большую длительность, в большинстве случаев целесообразна отделочная обработка ЛС, например, выглаживанием.

ЭИЛ и комбинированные методы на его основе имеют, в данном случае, широкую сферу применения, включая нанесение антифрикционных покрытий, многослойное и многокомпонентное легирование, подготовку поверхностей к нанесению твердосмазочных покрытий и прочее.

Возможности по восстановлению изношенных деталей этой группы ограничены, поскольку наблюдаемые (допустимые) величины износа часто превышают толщину слоев, наращиваемых при ЭИЛ.

В некоторых случаях, например, для отверстий малого диаметра, использование других методов поверхностного упрочнения проблематично, и методы ЭИЛ незаменимы. Следует отметить, что благодаря возможности нанесения самых различных материалов, ЭИЛ позволяет

обеспечивать триботехническую совместимость элементов пар трения из одноименных материалов или материалов склонных к схватыванию при трении.

Для восстановления деталей золотниковых пар, рекомендуется наносить и комбинировать материалы, формирующие износостойкие покрытия [Там же]. ЭИЛ ЛЭ из твердых сплавов ВК6-М, Т5К10 и другие, с последующей доводкой или алмазным выглаживанием. Величина восстановления при обработке по такой технологии составляет 5–15 мкм.

Восстановление заданной чертежом посадки подшипников может быть выполнено хромированием или меднением посадочных поверхностей наружной или внутренней обоймы. [Там же]. Целесообразной заменой данным методам будет ЭИЛ электродами из износостойких материалов.

Детали из титановых сплавов эксплуатируемые в условиях трения, фреттинга и эрозии из всех имеющих конструкционных металлов, применяемых в промышленности, обладают наихудшими антифрикционными свойствами [95, 109]. На практике часто сталкиваются с интенсивным разрушением титановых сплавов в результате фреттинг-коррозии, схватывания и задиорообразования в подвижных и номинально неподвижных сопряжениях. Повреждаемость деталей пар трения из титановых сплавов трудно предотвратить подбором материала сопряженной детали, смазки или оптимизацией конструкции узла [34].

Чаще всего при изготовлении деталей пар трения из титановых сплавов необходимо выполнить следующие технические требования: шероховатость рабочих поверхностей деталей находится в диапазоне $R_a = 0,32 \dots 1,25$ мкм; точность изготовления находится в диапазоне квалитетов *IT6 ... IT11*; детали должны обладать высокими показателями износостойкости, а также иметь хорошие антифрикционные свойства; должны удовлетворять требованиям по усталостной прочности.

Для упрочнения титановых сплавов перспективно использование комбинированных методов, основанных на сочетаниях ЭИЛ с алмазным выглаживанием, ионно-плазменным напылением, химико-термической обработкой, нанесением твердосмазочных покрытий, а также многослойное и многокомпонентное легирование.

Типичные детали из титановых сплавов, для которых целесообразно использовать ЭИЛ, приведены на рис. 5.1.



Рисунок 5.1 – Детали из титановых сплавов, упрочненных ЭИЛ и комбинированными способами

Доводка шероховатости поверхности до очень высоких классов, например полировок их, недопустимо, так как в этих случаях может быть нарушена герметичность. На сглаженной поверхности смазка не имеет возможности задержаться во впадинах микронеровностей, усилие трения увеличивается, темп процесса изнашивания возрастает. Поэтому выбирают оптимальную шероховатость [75].

5.2. Упрочнение гидроцилиндров ГТД

К двигателям пятого поколения предъявляются самые высокие эксплуатационные требования. Одним из таких требований является повышение тяги, ресурса узлов двигателя при повышении их удельной тяги. Ответственные детали двигателя испытывают критические нагрузки как силового, так и температурного характера, что в совокупности со сложными условиями работы становится фактором разрушающего воздействия на узлы и агрегаты.

Одной из групп таких узлов являются ГЦ, изготавливаемые, для снижения веса, из титановых сплавов (рис. 5.2), обеспечивающие управление створками сопла, статорными поворотными лопатками и др. (ГЦ системы управления критическим сечением реактивного сопла, ГЦ системы управления поворотным устройством реактивного сопла, ГЦ поворотного входного НА КНД, ГЦ поворотного НА КВД).

В большинстве случаев ресурс работы цилиндров много ниже ресурса двигателя в силу следующих факторов. При эксплуатации шток ГЦ испытывает осевые, радиальные усилия и вибрационные нагрузки вызывающие фреттинг-износ. Данные факторы приводят к износу и разрушению поверхности зеркала цилиндра при эксплуатации (наиболее интенсивно в крайних рабочих положениях штока), что вызывает нарушение герметичности. Достаточно сложная шарнирно-телескопическая связь ГЦ и их штоков через траверсы и рычажные механизмы с подвижными частями, например, реактивного сопла (внешними створками, проставками, надстворками) приводят к изгибающим моментам в системе гильза-шток. Происходит смятие резиновых и фторопластовых уплотнений и начинается нежелательное контактирование поверхностей зеркала цилиндра и штока. Разрушается антифрикционное покрытие, узел разгерметизируется, а затем заклинивает. Продукты износа (частицы металла) могут попадать в гидросистему, приводить к увеличению износа топливрегулирующей аппаратуры и засорению фильтрующих элементов топливного насоса. Скорость перемещения поршня в ГЦ может достигать 0,6 м/с при этом количество переключений (рабочих ходов поршня) за ресурс может превышать 20000. Износ уплотнений определяет надежную работу узла в течение 1200 часов, после чего необходима замена и ремонт в заводских условиях. Ресурс работы узла должен быть доведен до межремонтного ресурса двигателя. Характерные повреждения рабочей зоны цилиндра представлены на рисунке 5.5, з.



Рисунок 5.2 – ГЦ различных типоразмеров

Шток и тело ГЦ обычно изготавливают из титановых сплавов (сплав ВТ20), обладающих низкими антифрикционными свойствами, что объясняется несколькими причинами. Сплавы

обладают тонкой, естественной окисной плёнкой. При трении в процессе эксплуатации плёнка легко разрушается, что приводит к схватыванию контактирующих поверхностей. Низкие антифрикционные свойства титановых сплавов объясняются также их сравнительно низким модулем упругости, низкой прочностью граничного слоя смазки, низкой теплопроводностью и др.

По базовой технологии финишными операциями обработки зеркала ГЦ являются доводка и виброгалтовка стальными шариками в среде дисульфида молибдена. Шероховатость поверхности, при этом, не должна превышать значения $R_a = 0,2$ мкм. Такая обработка не всегда обеспечивает необходимого ресурса ГЦ.

Попытки использования различных методов нанесения на зеркало ГЦ износостойких покрытий не дали положительного эффекта. Гальванические и газотермические покрытия не обеспечили необходимой прочности сцепления с подложкой, а ионно-плазменные покрытия и химико-термическая обработка вследствие высоких температур процессов вызывали коробление ГЦ [89]. Кроме того, согласно техническим требованиям, упрочнению подлежит только бесштоковая полость зеркала цилиндра. Многие технологии нанесения покрытий требуют последующей, дополнительной механической обработки для получения необходимых геометрических параметров поверхностного слоя.

В ряде случаев используются гидроцилиндры с покрытием химическим никелем. Плохая адгезия таких покрытий к основному материалу приводит к отслоению покрытия в процессе шлифования и при эксплуатации. Кроме того, процесс отделки рабочих поверхностей является нетехнологичным, поскольку включает двойное шлифование до и после нанесения никеля и ручную доводку.

Рабочей средой для ГЦ являются топлива марок: РТ, ТС-1 ГОСТ 10227-86 (производство Р.Ф.), AVIATION TURBINE FUEL типа JetA-1 DEF STAN 91-91/ISSUE-2 (DERD2494) (производство Индии) [25].

Условия работы ГЦ:

- давление топлива, подаваемого к ГЦ входного НА КНД и поворотного НА КВД не более 100 (кгс/см²);
- давление топлива, подаваемого к ГЦ поворотного устройства и реактивного сопла не более 225 (кгс/см²);
- допустимая температура топлива (на входе в насос регулятор) от минус 40 до плюс 120 °С
- скорость перемещения поршня в ГЦ 0,6 (м/сек);
- количество переключений (рабочих ходов поршня) за ресурс – не менее 20000;
- поршень ГЦ (ответная, трущаяся по ГЦ деталь) – ЭП866-Ш с хромированием.

Требования к покрытию ГЦ:

- покрытие наносится на внутреннюю рабочую поверхность ГЦ в соответствии с чертежами;
- покрытие толщиной 4...6 мкм должно быть нанесено сплошным равномерным слоем без пропусков, оплавлений, инородных включений;
- покрытие должно обеспечить как минимум двукратное уменьшение износа внутренней поверхности по сравнению с базовой технологией упрочнения ГЦ (виброупрочнение шариками в присутствии дисульфида молибдена);
- шероховатость, внешний вид покрытия (текстура) – по согласованному технологическому образцу;
- применяемые материалы для нанесения покрытия должны быть доступны, отечественного производства.

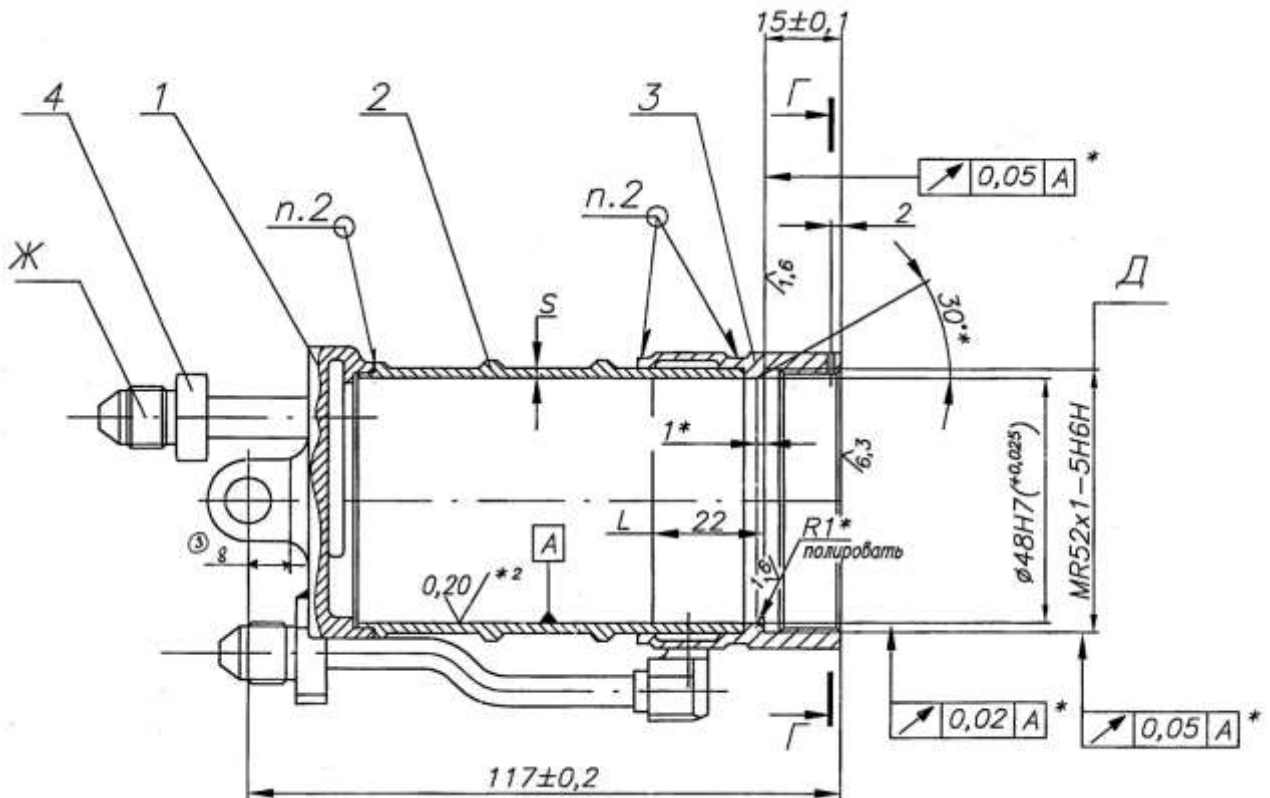


Рисунок 5.3 – Чертеж ГЦ с требованиями по точности изготовления и качеству поверхностей

В ТУ указано о необходимости поверхность А, кроме поверхности на длине L , обработать виброгалтовкой стальными шариками с дисульфидом молибдена по технологической документации (рис. 5.3).

Для повышения износостойкости применялось ЛКО углеродосодержащими электродами на установке ELFA731 с последующим выглаживанием алмазным индентором [41].

В качестве материалов ЛЭ использовался пористый графит, пирографит и углеродное волокно.

Выбор графита в качестве электродного материала обоснован рядом его достоинств:

- при взаимодействии с титаном образует карбиды обладающие высокой износостойкостью;
- включения графита повышают антифрикционные свойства, поскольку графит в свободном состоянии является твердосмазочным материалом;
- не требуется инертная или восстановительная среда, легирование может происходить на открытом воздухе;
- при ЛКО размеры деталей практически не изменяются, что является важным преимуществом.

ЛКО обладает рядом преимуществ, среди рассмотренных технологий поверхностного упрочнения. Локальность нанесения покрытия, возможность «сканирующего» перемещения инструмента по обрабатываемой поверхности максимально упрощают подготовительные операции. В основе ЛКО лежит процесс формирования тонкого слоя. Слой содержит карбиды и оксиды титана, образующиеся в результате воздействия импульсных электрических разрядов малой энергии на обрабатываемую поверхность [105, 21].



Рисунок 5.4 – Поверхность цилиндра: а) исходная, б) после ЛКО. в) поверхность цилиндра (I) после ЛКО (II) и алмазного выглаживания (III)

Возможность в процессе ЛКО огибать различные препятствия, без необходимости усложнять УП изменением траектории перемещения инструмента представлена на рисунке 5.4

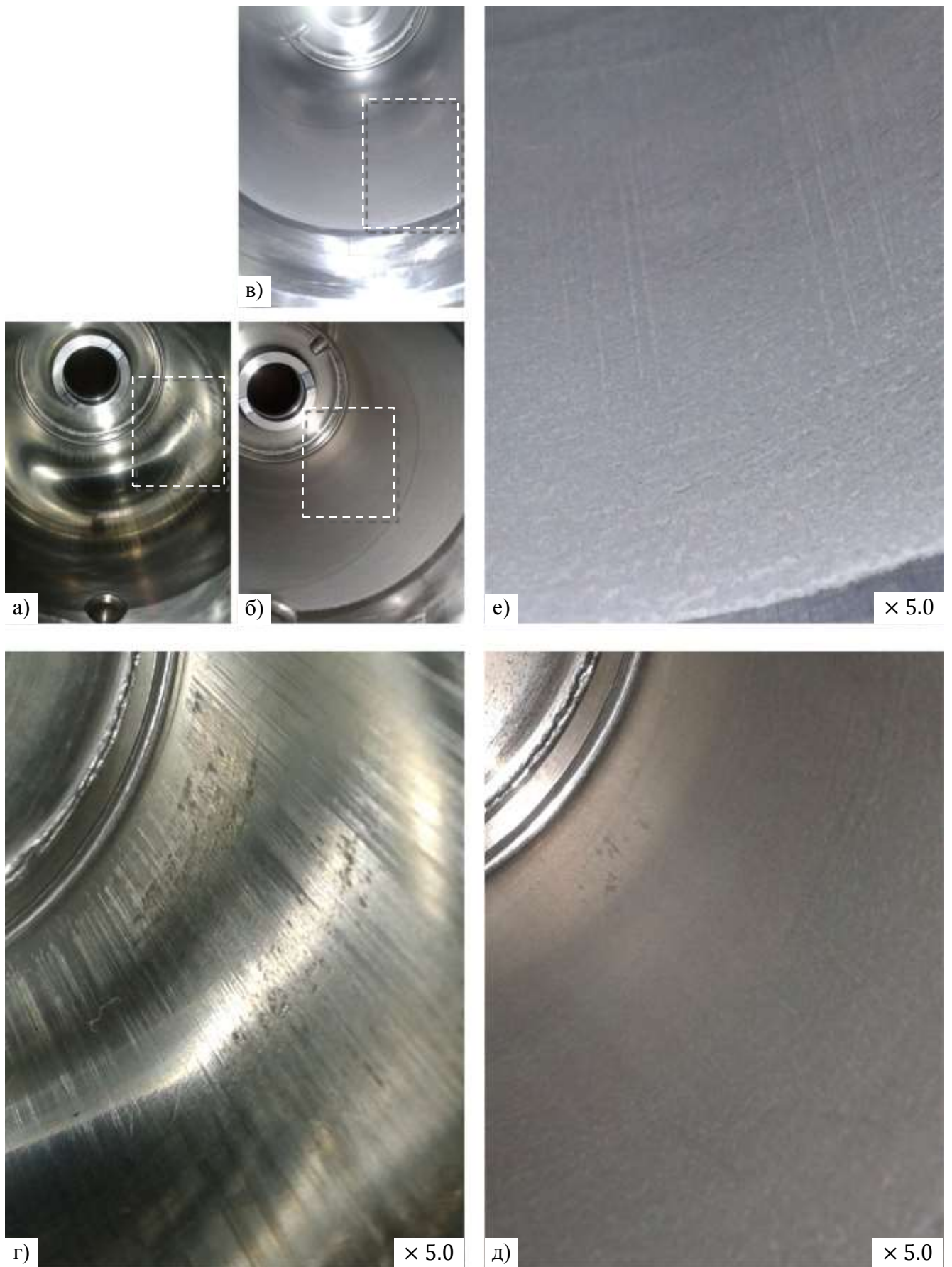


Рисунок 5.5 – Рабочая поверхность залечиваемого зеркала ГЦ: а) исходная; б) после ЛКО; в) после ЛКО и выглаживания. Соответственно (г, д, е) с пятикратным увеличением областей рисунка (а, б, в)

Взяв за основу, рассмотренную в главе 4, методику и проведя серию экспериментов на эквивалентных изделиях-образцах (с приближенными к реальным изделиям технологией и маршрутом их обработки) разработан технологический процесс финишной операции нанесения износостойкого покрытия, с последующим алмазным выглаживанием на ГЦ различной номенклатуры (рис. 5.2).

В ряде случаев требовалось провести ЛКО на поверхностях, имеющих конструктивные отверстия (рис. 5.4, в). Преимущество технологии ЛКО – сканирование инструментом обрабатываемой поверхности (I), позволили сформировать покрытие по контуру препятствия (II), без необходимости усложнения УП ЧПУ (для огибания отверстия) или создания сложной оснастки (для экранирования внутренних поверхностей отверстия) [36, 37].

В ЛКО участвовали не только новые, но и снятые с изделий в процессе ресурсных испытаний ГЦ. А также цилиндры, вторично участвующие в ресурсных испытаниях (зеркало ГЦ не удовлетворяло требованиям чертежа по точности изготовления и качеству поверхности под последующее ЛКО и алмазное выглаживание). На поверхности зеркала визуально определялись: высокая шероховатость поверхности, наличие характерной неровности (рельеф после механической обработки) [114], а также эрозия, сколы поверхности, задиры, царапины, каверны (рис. 5.5–5.8).

Алмазное выглаживание залеченного зеркала цилиндра (поверхность с характерной микрогеометрией от последствий износа) происходит без риска разрушить покрытие индентором (прорвать и получить задиры на поверхности), о чем говорилось в главе 4.

Зеркало ГЦ с грубой механической предварительной подготовкой поверхности (ручная зачистка задиры и каверн) под ЛКО и последующее алмазное выглаживание представлено на рисунках 5.6 и 5.7. Данное изделие не отвечало требованиям, необходимым для проведения технологических операций ЛКО. Особенностью карбооксидирования является пространственное формирование покрытия на поверхности (рис. 4.13) с воспроизведением её микрогеометрии (неровности микрогеометрии с размерами порядка нескольких микрон подвергаются залечиванию).

Наличие на поверхности, предназначенной под нанесение покрытия, характерной микрогеометрии от предшествующей механической обработки (предположительно, чистового точения) теоретически устранимо методом ЛКО за счет увеличения энергии импульсов (при этом необходимо учитывать требуемые значения параметра шероховатости Ra зеркала ГЦ, после алмазного выглаживания), и незначительного повышения удельного усилия выглаживания на 3...5 кгс.

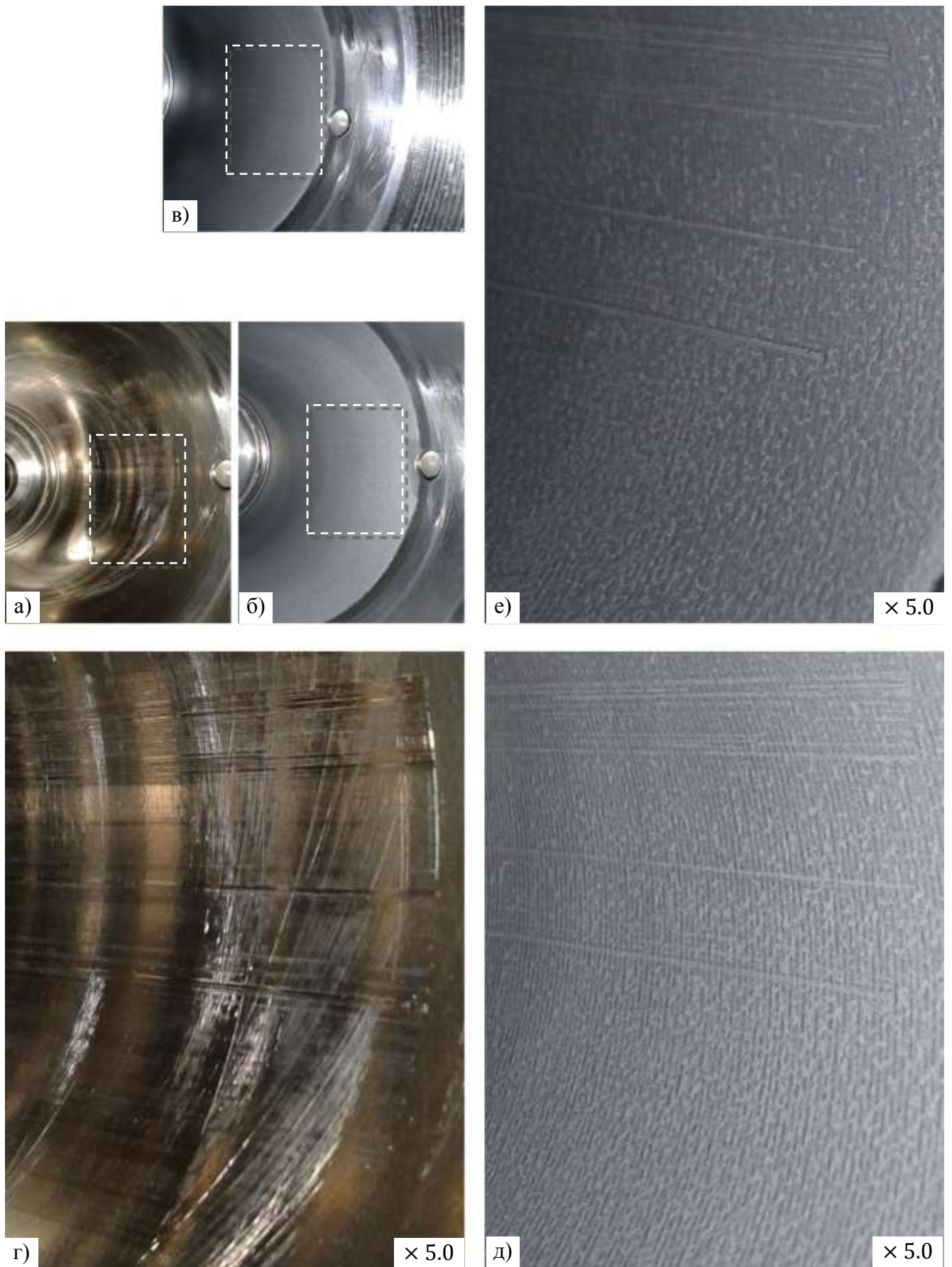


Рисунок 5.6 – Рабочая поверхность залечиваемого зеркала ГЦ: а) исходная; б) после ЛКО; в) после ЛКО и выглаживания. Соответственно (г, д, е) с пятикратным увеличением областей рисунка (а, б, в)

Непосредственное выглаживание с обильной подачей смазывающего вещества в зону контакта индентора с поверхностью зеркала цилиндра в определенных случаях (неудовлетворительная шероховатость поверхности после операции выглаживания из-за завышенных значений R_a поверхности зеркала цилиндра перед легированием, рис. 5.4) позволяет превышать допустимые значения удельного усилия выглаживания в несколько раз (нагрузка на индентор при выглаживании составляла свыше 38 кгс).

В определенных случаях, после ЛКО обнаруживался дефект покрытия (нарушение сплошности покрытия в форме кольца) рисунок 5.8, б. Причиной тому может служить достаточно глубокий кольцевой дефект на зеркале ГЦ (расстояние между ЛЭ и обрабатываемой поверхностью больше величины МЭП, необходимого для возникновения пробоя). Характерный дефект наблюдался на всей партии цилиндров и не является ошибкой оператора установки (траектория дефекта – в виде кольца не совпадает с траекторией движения ЭИ – в виде спирали с заданным углом подъема спирали). Устранение дефекта в покрытии происходит за счет повторного легирования оголенного участка по УП ОЗ с пониженными значениями скорости перемещения ЛЭ V_3 относительно упрочняемого участка.

Важно отметить, что нарушение сплошности покрытия недопустимо согласно техническому заданию. Кроме того, хоть и маловероятно, но возникает возможность получить задиры на данном участке и последующий разрыв покрытия при алмазном выглаживании.

Присутствие в покрытии нарушений сплошности (пропуски в виде точечных и кольцевых, спиралевидных участков) из-за возникшего сбоя программного обеспечения оборудования, нарушения в стабильности работы следящей системы (постоянство МЭП) или перебои в электрической сети питания установки легко устранимы.

В конкретном случае (рис. 5.9, з) присутствует нарушение целостности покрытия по вине оператора установки (траектория пропуска соответствует траектории движения инструмента – спиралевидная). Залечивание покрытия происходило по программе аналогичной нанесению покрытия на всю поверхность зеркала ГЦ. Отрабатываемая инструментом область ограничивалась величиной дефекта (шириной не пролегированного участка) с небольшой зоной перекрытия по отношению к уже нанесенному ЛС.

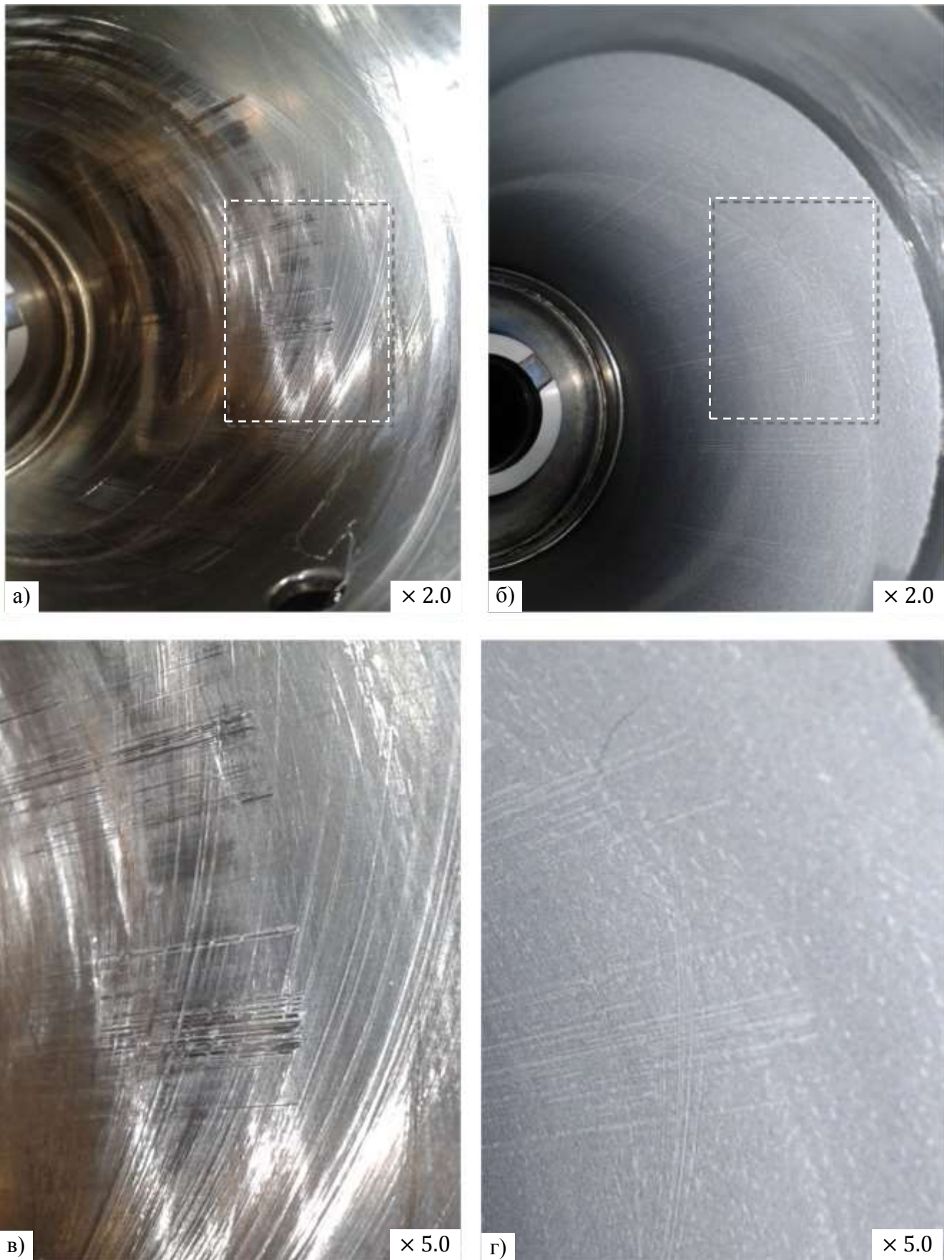


Рисунок 5.7 – Рабочая поверхность залечиваемого зеркала ГЦ: а) исходная; б) после ЛКО.

Соответственно (в, г) с пятикратным увеличением областей рисунка (а, б)

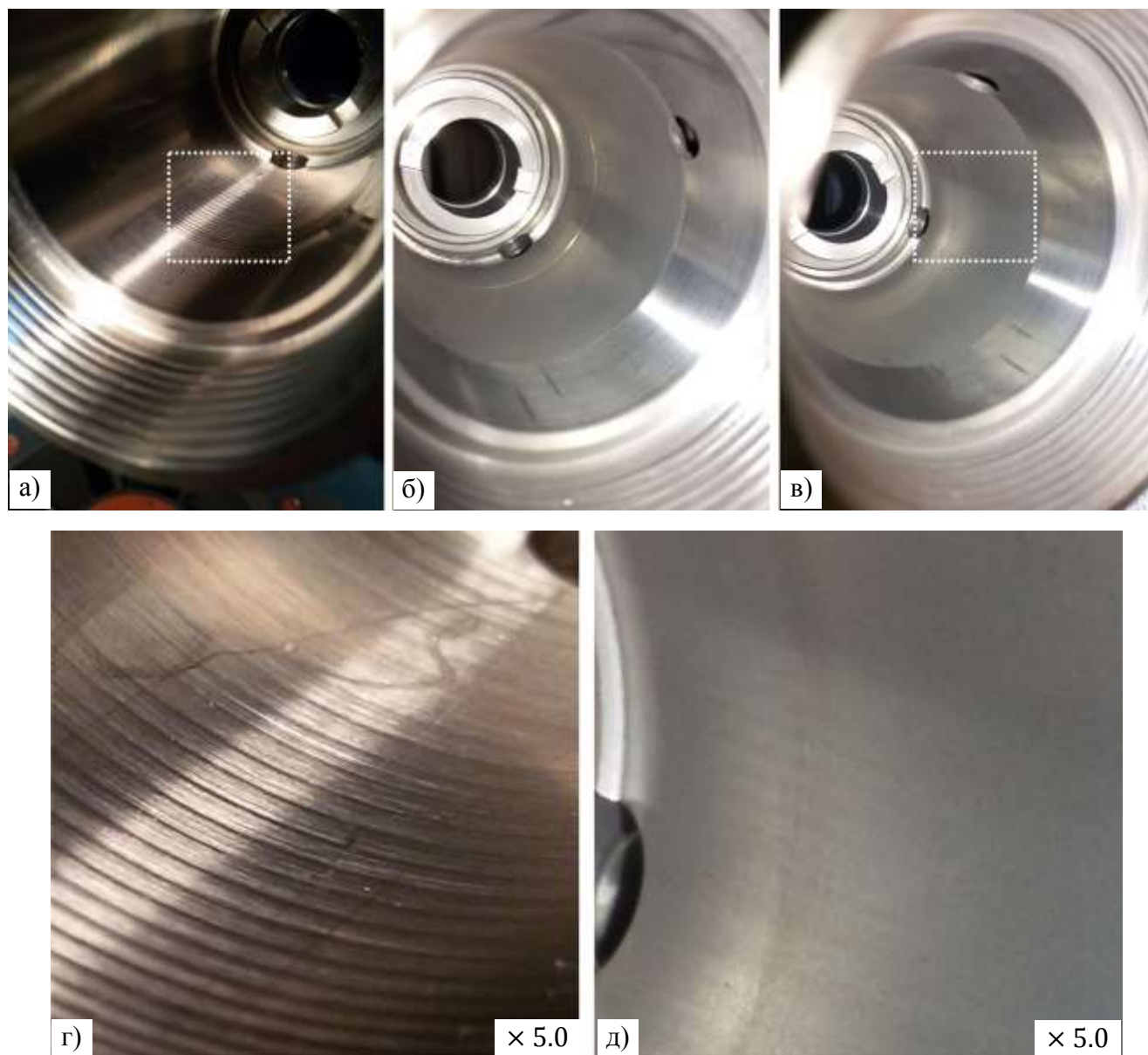


Рисунок 5.8 – Рабочая поверхность зеркала ГЦ с характерным микрорельефом: а) исходная; б) после ЛКО и залечивания; в) после ЛКО, залечивания и выглаживания.

Соответственно (г, д) с пятикратным увеличением областей рисунка (а, в)

Во время технологической операции ЛКО нанесения износостойкого покрытия практически исключена возможность получить забракованное изделие (не смотря на то, что ЛКО и последующее алмазное выглаживание являются финишными операциями в общем технологическом процессе изготовления ГЦ). Гибкость переналаживаемой УП позволяет оператору установки в кратчайшие сроки изменить параметры программы и произвести залечивание покрытия согласно новым значениям. При грубом нарушении технологии алмазного выглаживания (несоблюдение технологических рекомендаций и требований проведения операции алмазного выглаживания) возможно образование задира. В результате чего происходит интенсивное намазывание титана на вершину индентора и приводит к

дальнейшему разрыву покрытия. Своевременное выявление данного сбоя оператором станка и незамедлительная остановка операции выглаживания позволяет после незначительных механических доводок разорванного участка в покрытии вернуть цилиндр на повторное легирование. В дальнейшем, при удовлетворительном заключении о качестве залеченного участка, ГЦ повторно отправляют на выглаживание со скорректированными режимами.

Если после ЛКО при контроле качества полученного легированного слоя выявляются отклонения, следует определить характер нарушения технологии формирования покрытия. В зависимости от степени несоответствия тех или иных показателей качества слоя технологом, отвечающим за карбооксидирование, принимается решение о необходимых мероприятиях по доведению качества покрытия до требуемых по ТУ. При этом следует обратить внимание на коррекцию режимов выглаживания для получения оптимальных показателей качества формируемого покрытия на конечном этапе (рис. 5.8).

Особенность геометрии и размеров обрабатываемых поверхностей некоторых цилиндров (длина рабочей части свыше 150 мм) не позволяла визуально проконтролировать процесс легирования и выглаживания, без применения специальных технических средств. С этой целью был задействован промышленный эндоскоп OLYMPUS ILK-4 (рис.5.10), позволивший упростить этапы наладки и контроля оборудования в процессе обработки длинномерных цилиндров, а также визуального контроля качества получаемых покрытий.

Разработанная технология не потребовала внесения изменений в действующий техпроцесс производства детали, заменены только финишные операции. Предложенные технологические решения обеспечили технические требования по точности и микрогеометрии рабочей поверхности. Испытания, выполненные на технологическом изделии показали, что износ зеркала за время наработки минимален, а его величина в 2...3 раза ниже, чем у цилиндров, обработанных по базовой технологии.

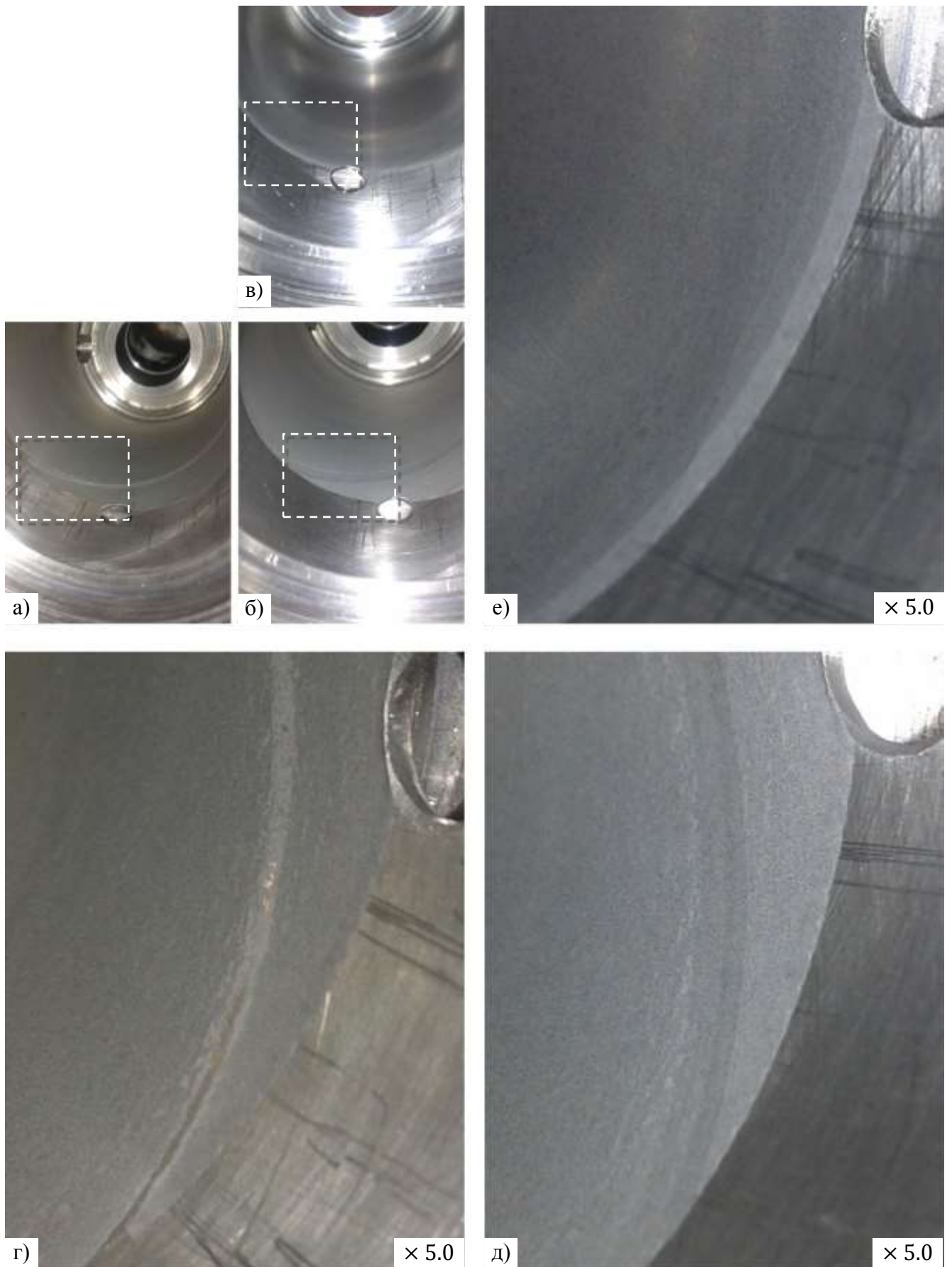


Рисунок 5.9 – Рабочая поверхность зеркала ГЦ с имеющимся пропуском покрытия: а) После ЛКО со спиралевидным пропуском покрытия; б) после ЛКО и последующим залечиванием пропуска в покрытии; в) после ЛКО, залечивания и выглаживания. Соответственно (г, д, е) с пятикратным увеличением областей рисунка (а, б, в)



Рисунок 5.10 – Промышленный эндоскоп OLYMPUS ILK-4, и визуальный контроль поверхности ГЦ, выглаженной после ЛКО

Таким образом, ЛКО позволяет значительно повысить ресурс узла, без внесения каких-либо конструктивных изменений в геометрию детали. Последующее выглаживание окончательно формирует рабочую поверхность ГЦ с требуемыми эксплуатационными характеристиками и микрогеометрией.

5.3. Оборудование и оснастка для выполнения упрочнения

ЛКО выполнялось на установке ELFA731 с ЧПУ по программе, обеспечивающей равномерное упрочнение зеркала цилиндра (рис. 5.11).

Для эффективного осуществления необходима соответствующая организация такого процесса: выбор материала ЛЭ, периодическое повторение электрических разрядов и поддержание условий, обеспечивающих их протекание, относительное перемещение ЛЭ и упрочняемого изделия. Участки поверхности, воспринявшие электрический разряд, претерпевают существенные изменения. Происходит плавление и испарение материалов в зонах их сопряжения с каналами электрических разрядов. Под действием давлений образующихся паров и электродинамических сил, эти материалы в виде перегретых жидкостей и паров выбрасываются в МЭП, перемешиваются, химически соединяются друг с другом и составляющими межэлектродной среды и, взаимодействуя с поверхностью детали, образуют карбоксидный слой.

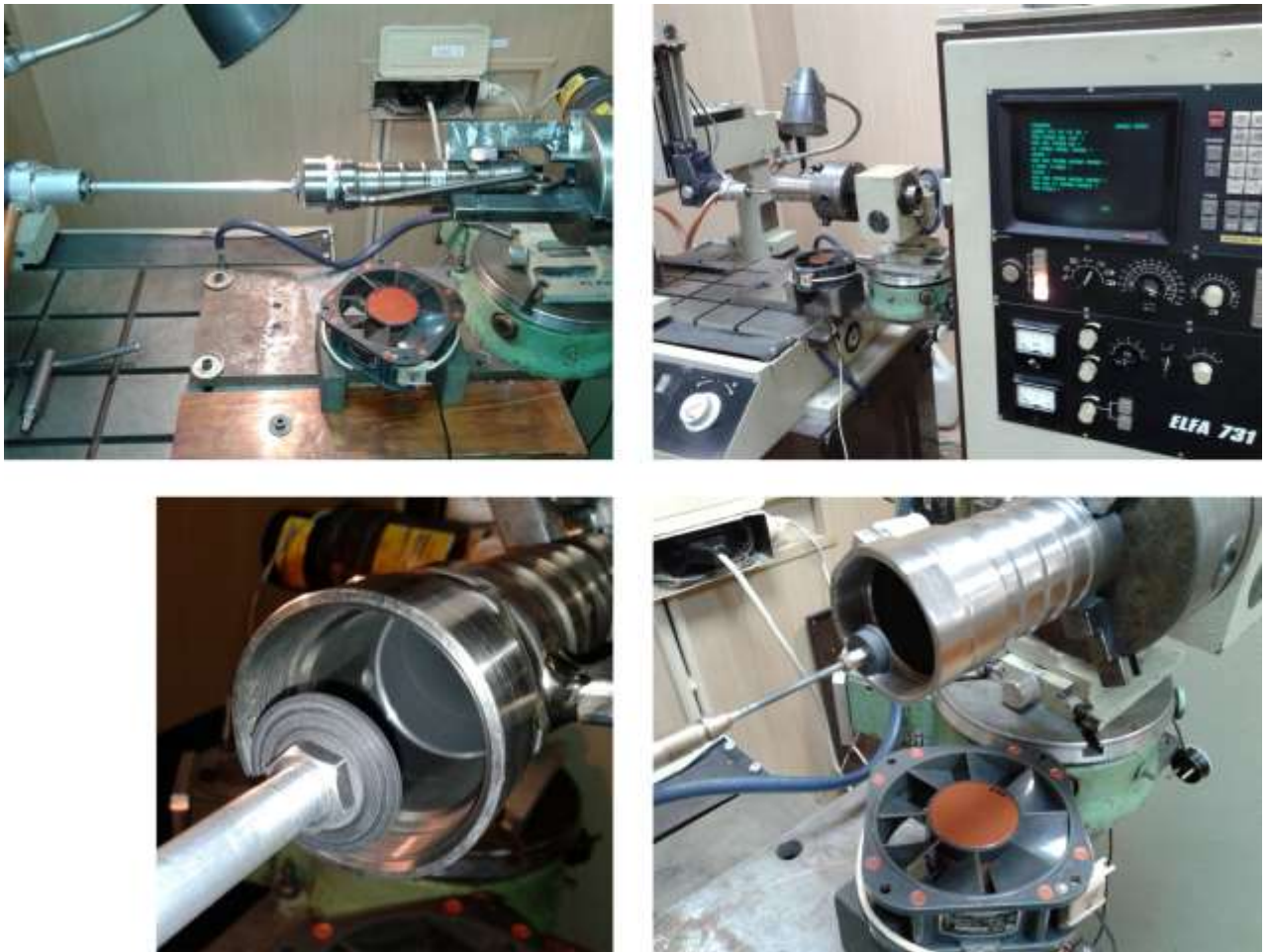


Рисунок 5.11 – Установка ELFA731 для нанесения покрытий во время ЛКО цилиндров различных типоразмеров

В качестве материалов ЛЭ использовался графит элементный марки ГЭ-1 (рис. 5.12), графит мелкозернистый марки МГ-1 и углеродное волокно, пирографит. Применение ЛЭ из углеродных волокон повышает стабильность процесса ЛКО и позволяет исключить паразитные разряды, возникающие через сколовшиеся частички графитового электрода.

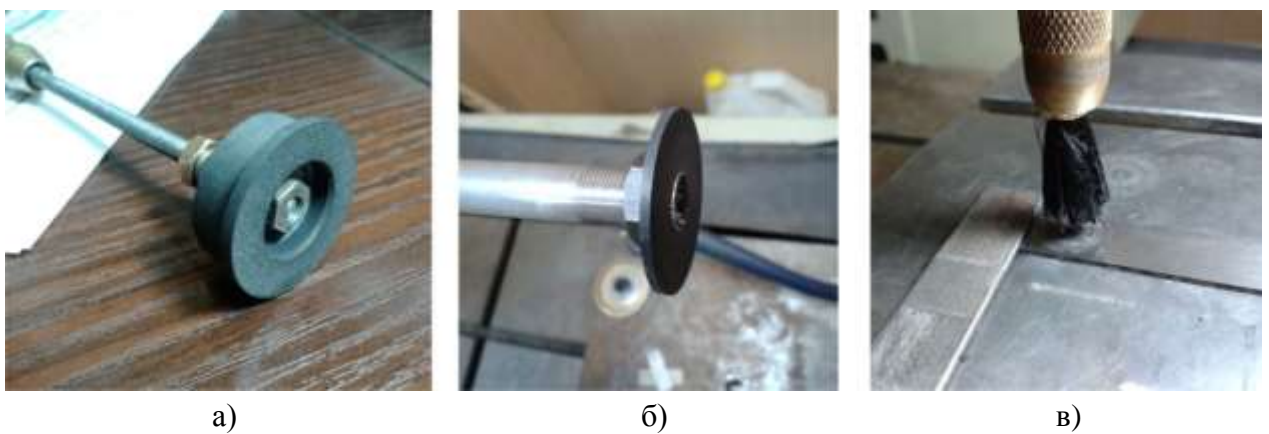


Рисунок 5.12 – Инструмент для легирования цилиндров различных типоразмеров (а, б); инструмент для легирования плоских поверхностей (в)

Формирование слоя происходит в условиях высокоскоростного плавления и охлаждения, деформирования его термическими напряжениями и газодинамическими давлениями от электрического разряда. В результате образуется мелкодисперсная структура, сложного состава, толщиной (3...10 мкм). Во время ЛКО происходит упрочнение и насыщение поверхности титановых сплавов элементами из окружающей среды, а также легирование углеродом с образованием карбида титана[24].

Для определения фазового состава получаемых покрытий проводились исследования образующихся в них соединений на порошковом рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance (рис. 5.13).

Дифрактометр Bruker D8 Advance позволяет установить зависимость интенсивности излучения рентгеновских лучей, рассеянных покрытиями и плёнками, суспензиями, порошкообразными образцами, стёклами, произвольно ориентированными кристаллами и монокристаллами и т.д., от угла дифракции 2θ в диапазонах температур от -180 до $+1600$ С°.

На дифрактометре можно проводить как количественный, так и качественный рентгеноструктурные анализы. При проведении качественного анализа применяются специализированные базы данных порошковых рентгенограмм PDF органических и неорганических соединений. Для проведения количественного рентгеноструктурного анализа могут применяться программные комплексы FULLPROF, TOPAS с применением метода Ритвельда для уточнения структуры.



Рисунок 5.13 – Порошковый рентгеновский дифрактометр D8 ADVANCE

Для проведения исследований были установлены следующие параметры дифрактометра: рабочий режим – 40 кВ, 40 мА, Cu излучение, никелевый фильтр. Диапазон измерений угла сканирования 2θ от 5° до 80° с шагом по углу сканирования равным $0,01^\circ$. Качественный фазовый анализ образцов проведен с использованием базы данных рентгенографических порошковых стандартов JCPDS ICDD PDF-2.



Рисунок 5.14 – Легирование титановых образцов VT20 после чистового точения

Легирование (упрочнение) выполнялось на титановых образцах VT20 после чистового точения (рис. 5.14) со следующими режимами установки ELFA731 (табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Режимы установки ELFA731

Образец	А	Б	В	Г	Д	Е
Ток короткого замыкания I_k (А)	11,2	11,2	6,4	6,4	8,0	8,0
Скважность q	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Длительность импульса напряжения t_{on} (мкс)	3,0	3,0	3,0	3,0	5,0	5,0
Скорость движения ЛЭ относительно упрочняемой поверхности V_3 (мм/мин)	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
Скорость вращения ЛЭ относительно упрочняемой поверхности V_{30} (об/мин)	4000,0	4000,0	4000,0	4000,0	4000,0	800,0
Время легирования единицы поверхности t_e (мин/мм ²)	0,078	0,039	0,078	0,039	0,039	0,039

Режимы, при легировании образцов А и Б, соответствуют процессу упрочнения с высокими энергиями импульсов. Режимы, при легировании образцов В и Г, соответствуют процессу упрочнения со средними энергиями импульсов. Режимы, при легировании образцов Д и Е, соответствуют процессу упрочнения с малыми энергиями импульсов.

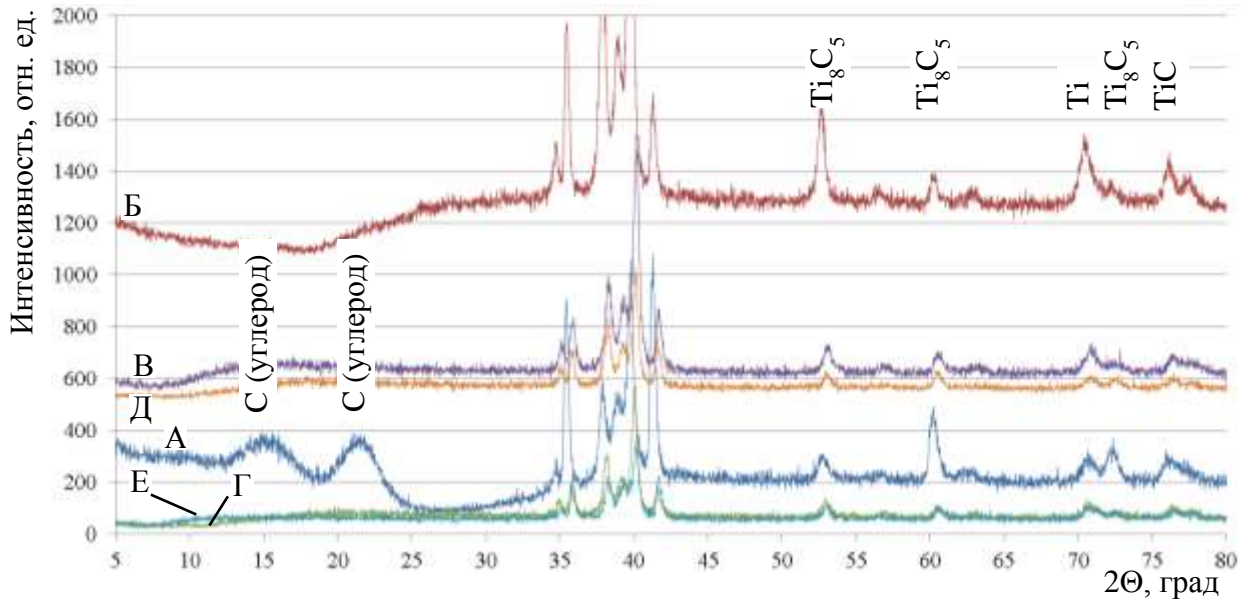


Рисунок 5.15 – Рентгенограмма покрытий образцов А - Е после качественного анализа с применением банка данных порошковых рентгенограмм PDF-2

В исследуемых покрытиях обнаруживаются: структура упорядоченной фазы Ti_8C_5 , принадлежащей к тригональной сингонии (пр.гр. $R\bar{3}m$); TiC , а также структура $Ti_6C_{3.75}$. (рис. 5.15-5.16).

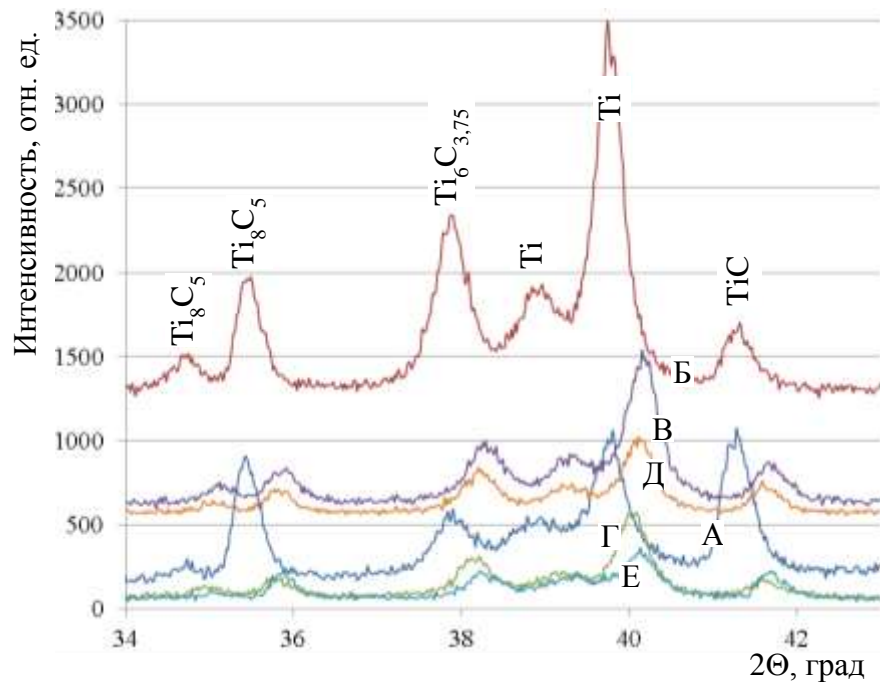


Рисунок 5.16 – Рентгенограмма покрытий образцов А - Е после качественного анализа с применением банка данных порошковых рентгенограмм PDF-2



Рисунок 5.17 – Микроскоп-спектрометр Renishaw U 1000

На микроскоп-спектрометре Renishaw U 1000 (рис. 5.17) были получены спектры комбинационного рассеяния света в интервале $4000\text{--}50\text{ см}^{-1}$ с исследуемых покрытий. Микроскоп оборудован монохроматором SPEX. В качестве возбуждающего источника света использовали аргоновый лазер с длиной волны $514,5\text{ нм}$.

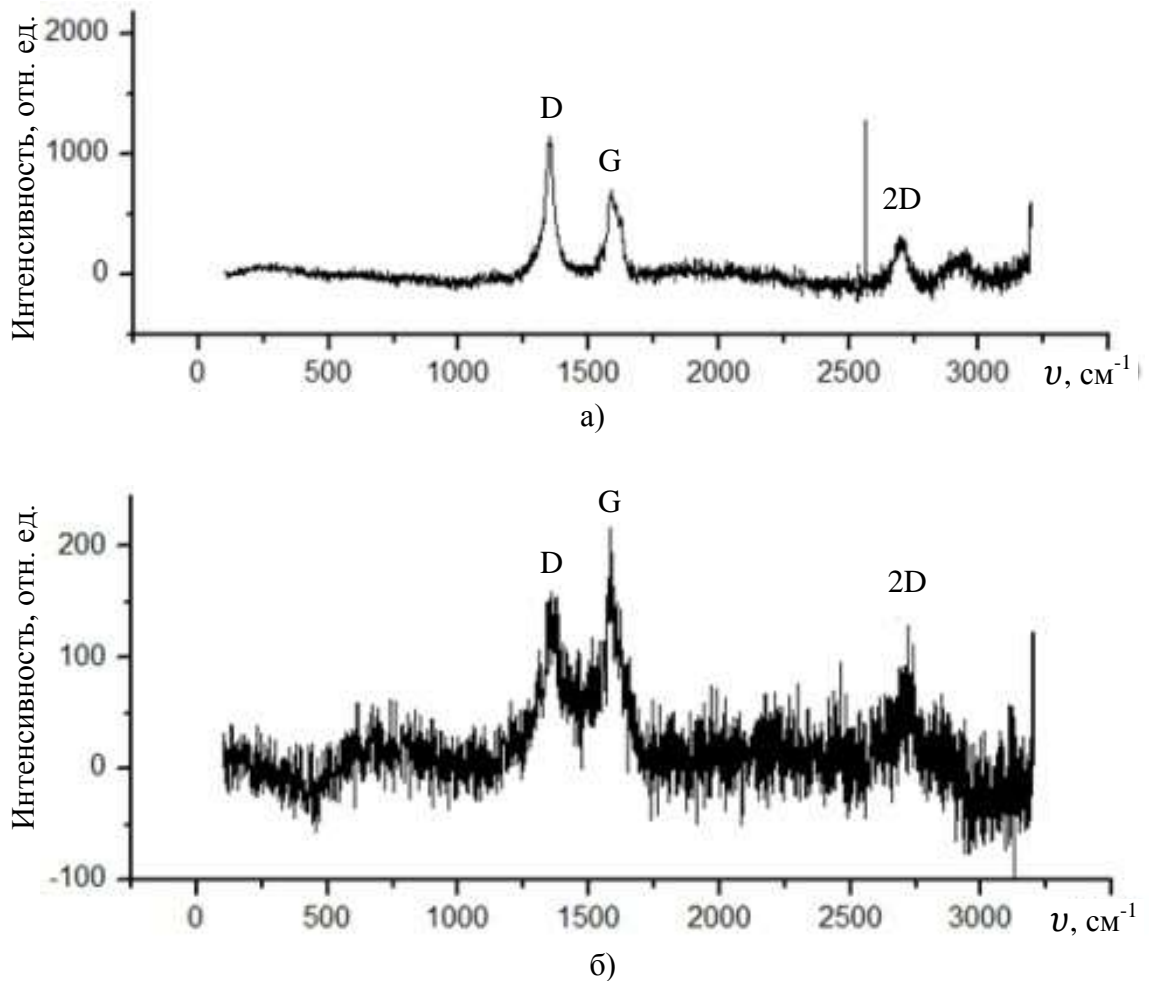


Рисунок 5.18 – Спектры частот ν комбинационного рассеивания для образцов А – Е.

а) $I_D/I_G = 1,57$; б) $I_D/I_G = 0,71$. G, 2D, D спектральные линии

В исследуемых покрытиях локально обнаружены участки с высокой степенью кластеризации графитовых слоев G – спектральная линия sp^2 углерод (рис. 5.18, б), а также D – спектральная линия sp^3 углерод. В покрытиях обнаружено разупрочнение связей атомов углерода, присоединение атомов водорода и кислорода к атомам углерода, имеющих свободные валентности (отношение интенсивностей $ID/IG = 1,57$) рисунок 5.18, а.

Формирование состава покрытия, вероятно связано с особенностями протекания процессов электроразрядного воздействия и переноса материала ЛЭ на титановую подложку. Благодаря интенсивным процессам диспергирования и сублимации анода – графита уже в начале процесса ЛКО на катоде, в зоне воздействия разрядов, появляется слой мелкодисперсного графита, который при дальнейшей обработке покрывает всю легируемую поверхность. Последующие разряды протекают в этом слое и через него, который, возможно, и защищает жидкую фазу титана от интенсивного окисления. Наличие большой концентрации углерода в зоне появления жидкой фазы титана обеспечивает в первую очередь синтез TiC (хотя у титана более высокое сродство к кислороду) и диффузию углерода в титановую подложку.

Выглаживание выполнялось на токарно-винторезном станке модели 16K20 с диапазоном подач и числом оборотов шпинделя необходимых для формирования на покрытии требуемой шероховатости. Нагрузка на индентор подбиралась в зависимости от исходной шероховатости покрытия (рис. 5.19).



Рисунок 5.19 – Индентор во время выглаживания зеркала цилиндра с износостойким покрытием

Использование специально спроектированного устройства, обеспечивало требуемое усилие при выглаживании даже при наличии больших радиальных биений при вращении заготовки (рис. 5.20).

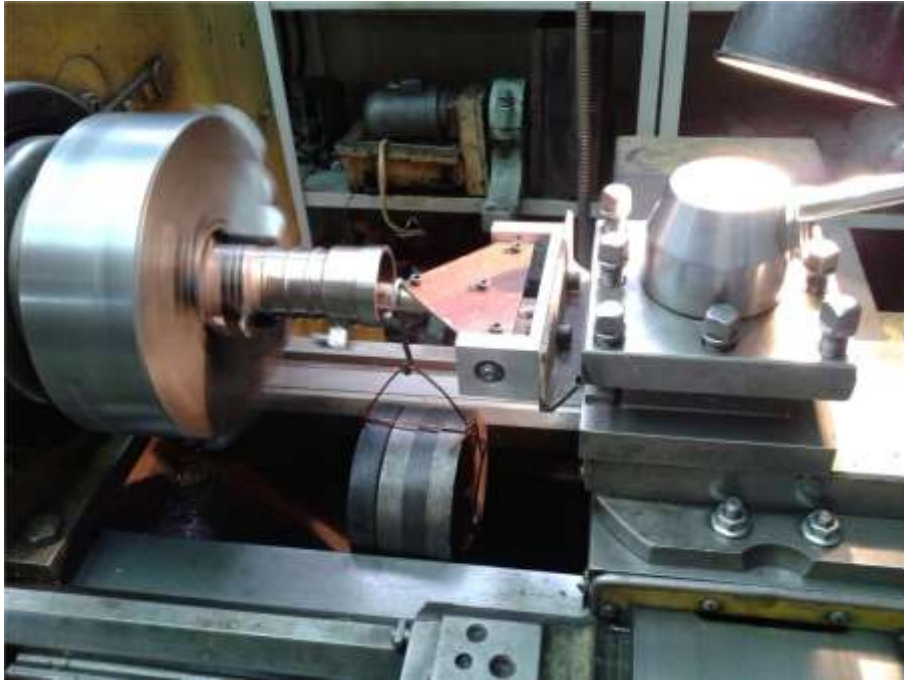


Рисунок 5.20 – Приспособление с самоустанавливающейся державкой алмазного индентора для выглаживания цилиндра на токарном станке

Для контроля шероховатости поверхности на всех этапах эксперимента выполнялись измерения на оборудовании Mitutoyo Surftest SJ-210, позволяющем провести оценку качества получаемого покрытия после ЛКО, и итоговой поверхности после выглаживания (рис.5.21).



Рисунок 5.21 – Измерение параметров шероховатости поверхности зеркала цилиндра на SJ-210

Для реализации возможности внесения в существующий производственный процесс серийного изготовления ГЦ изделий рассмотренных выше и предлагаемых технологических операций ЛКО и алмазного выглаживания. А также дооснащения производственных подразделений предприятия оборудованием, необходимым для проведения поэтапных мероприятий ЛКО и алмазного выглаживания, направленных на повышение ресурса ГЦ, было

спроектировано и разработано соответствующее оборудование и приспособления. Внешний вид спроектированного и изготовленного опытного оборудования представлен на рисунке 5.22.

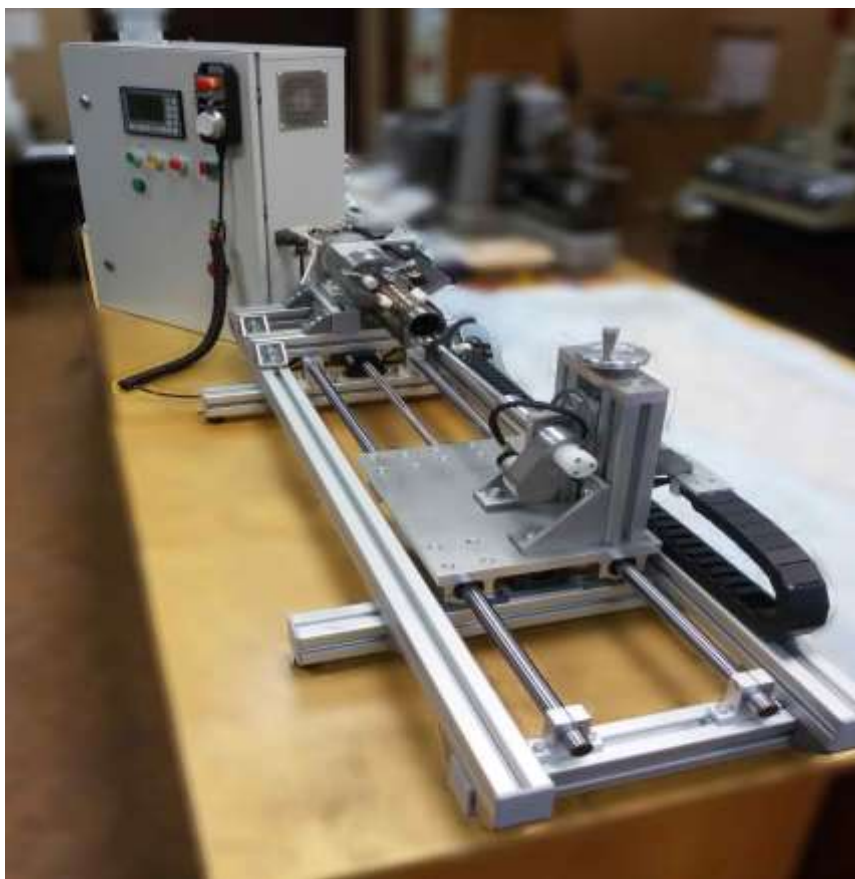


Рисунок 5.22 – Внешний вид установки для ЛКО

Представленное оборудование выполнено по унифицированной схеме. Координаты назначены согласно нормативной документации [22]. Все компоненты имеют отечественные аналоги.

Общая компоновка установки показана на рисунках 5.23 и 5.24. Она смонтирована на каркасе 1, выполненном из алюминиевого конструкционного профиля. Суппорт 2, обеспечивающий программируемое перемещение по оси Z наносящей головки 4, установлен

на направляющих 5. Перемещение производится ходовым винтом 7. Подвод электропитания к наносящей головке выполняется гибким проводом 3. Программируемый поворот детали выполняется поворотной осью 6, имеющей привод 8. На поворотной оси 6 установлен патрон 9 с кулачками 10, служащий для базирования и закрепления детали.

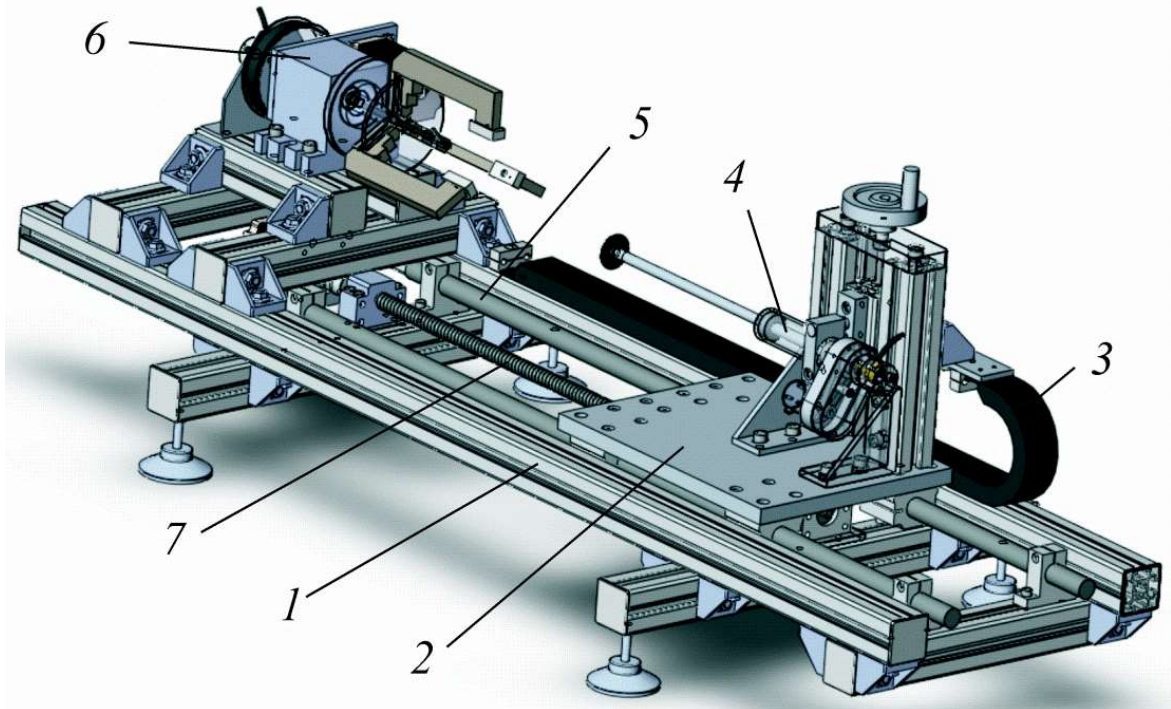


Рисунок 5.23 – 3D модель установки: 1 – каркас; 2 – суппорт; 3 – гибкий провод; 4 – наносящая головка; 5 – направляющие; 6 – поворотная ось; 7 – ходовой винт привода суппорта

На кулачках установлены диэлектрические насадки 11 (рис. 5.24), служащие для изоляции детали от корпуса установки. Включение заготовки в цепь генератора импульсов осуществляется посредством токосъемника, установленного в держателе 8. Вращение шпинделя наносящей головки с дисковым графитовым ЛЭ 13 производится приводом 12. Установка имеет опоры 14.

На суппорте установки размещена каретка, служащая для установки положения ЛЭ относительно упрочняемой детали в вертикальном направлении. Сложная система поддержания межэлектродного зазора исключена посредством системы самоустанавливающегося шпинделя наносящей головки 4 относительно легируемой поверхности. Выдерживается необходимое минимальное усилие контакта торца дискового электрода с поверхностью зеркала цилиндра. Условие обеспечивает оптимальное состояние межэлектродного зазора для возникновения искровых разрядов. При этом исключается чрезмерное контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью, что может привести к повышенному его износу, и как следствие, деградации сплошности покрытия (глава 3).

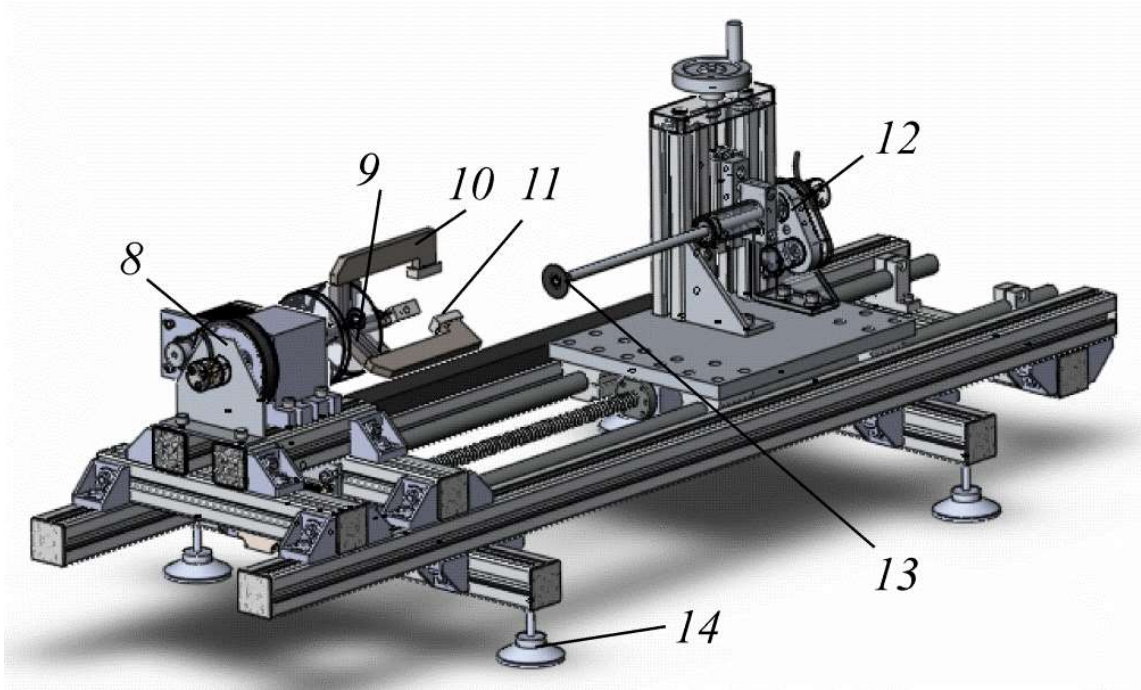


Рисунок 5.24 – 3D модель установки: 8 – привод поворотной головки; 9 – патрон поворотной оси; 10 – кулачки зажима упрочняемого изделия; 11 – диэлектрические насадки; 12 – привод наносящей головки; 13 – шпиндель наносящей головки с графитовым ЛЭ; 14 – опоры;

Для выглаживания ГЦ спроектировано и предложено универсальное приспособление (рис. 5.23) под станки токарной группы (размеры резцедержателя), например токарно-винторезный станок 16К20.

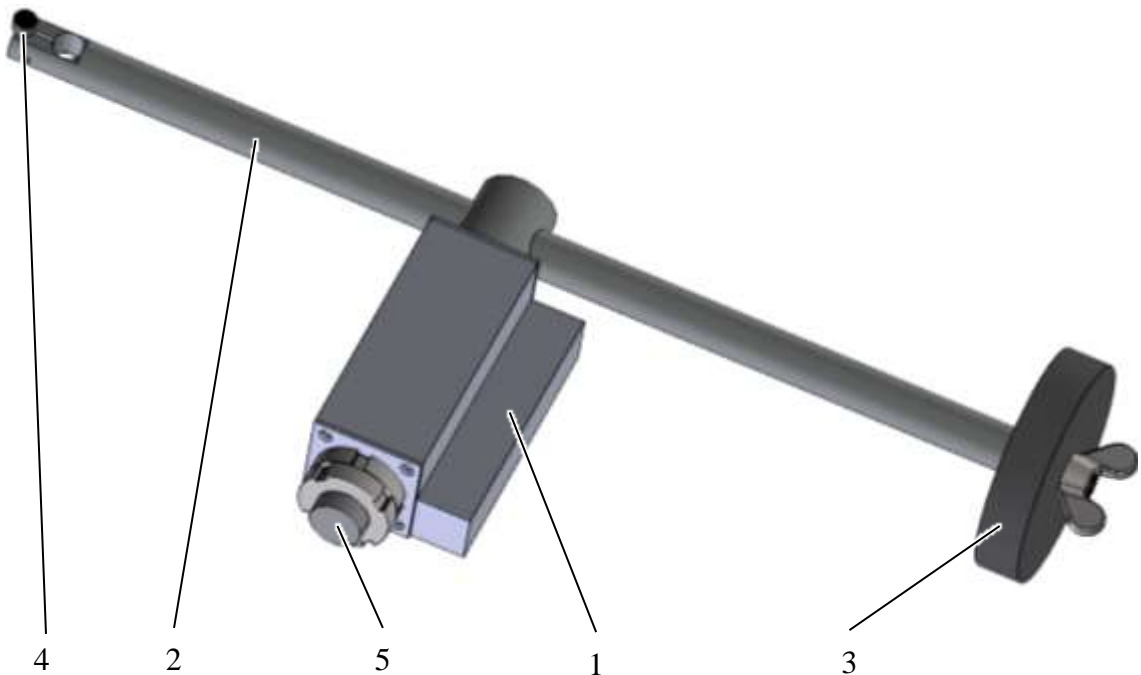


Рисунок 5.25 – Приспособление для алмазного выглаживания: 1 – корпус; 2 – балка; 3 – груз; 4 – алмазный индентор; 5 – ось

Корпус 1 устанавливается в резцедержатель станка, элементом нагружения 3 задается необходимое усилие на инденторе 4. Балка 2 при помощи оси 5 может совершать свободные колебания относительно корпуса. Этим обеспечивается плавающее перемещение индентора с постоянным удельным давлением по поверхности зеркала, неточно закреплённого в патроне станка, ГЦ (с небольшими радиальными биениями) при выглаживании.

Сферическая форма вершины индентора позволяет обеспечивать постоянное пятно контакта при выглаживании даже при качениях балки относительно корпуса свыше 2° .

5.4. Программное обеспечение ЧПУ и комбинированного упрочнения типовых деталей и поверхностей

Математическое обеспечение микропроцессорного устройства ЧПУ, которым оснащена установка ELFA731, позволяет разрабатывать гибкие УП, удобные при использовании в условиях единичного и мелкосерийного производства, поскольку позволяют выполнять обработку типовых деталей и поверхностей. Достаточно ввести с пульта необходимые параметризованные размеры обрабатываемой детали или поверхности, чтобы адаптировать такую УП к упрочнению конкретной детали.

Если обрабатываемая поверхность представляет собой сложный контур, целесообразно применять специальные программные комплексы, формирующие УП на основе чертежа или трехмерной модели. Чертеж или модель разрабатывается в системах автоматизированного проектирования и сохраняется в открытых форматах обмена данными. Так, получить УП из чертежа формата «*dxf*» возможно с применением, самостоятельно разработанного, небольшого приложения [38].

Параметризованные УП пишут с использованием макрофункций, т.е. подпрограмм, позволяющих выполнять арифметические и логические операции по командам, содержащимся в тексте управляющей программы. Гибкие программы строятся на основе предварительно разработанных алгоритмов. Ниже приведены несколько наиболее часто используемых управляющих программ [6].

Программа О1 легирования по винтообразной возвратно-поступательной траектории (рис. 5.26–5.28). Применяется для нанесения покрытий на наружные и внутренние цилиндрические поверхности различных типоразмеров. Параметр t выбирается, согласно рекомендациям из главы 3, таким образом, что пятно контакта электрода с обрабатываемой поверхностью цилиндра обеспечивало небольшое перекрытие между собой формируемых винтообразных полос при легировании. Расстояние от точки 0 до точки 1 ($0 - 1$) обозначим через параметр Lz . Следует учитывать, что задаваемая скорость перемещения ЛЭ V_3 относительно упрочняемого участка будет линейной, исходя из особенностей

программирования ЧПУ системы "Fanuc-3M". Если предполагается работать с широкой номенклатурой изделий разного диаметра, следует позаботиться об оптимизации программного кода, представленного в приложении 2.

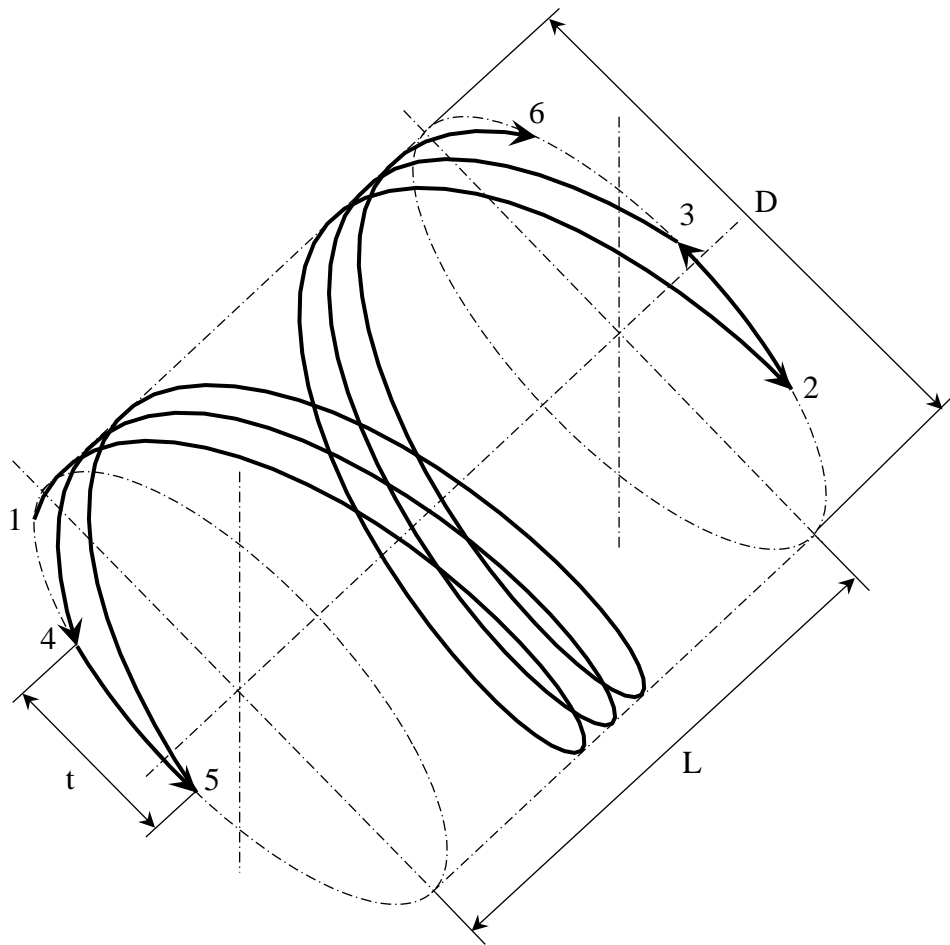


Рисунок 5.26 – Операционный эскиз программы О1. Пространственная траектория движения ЭИ

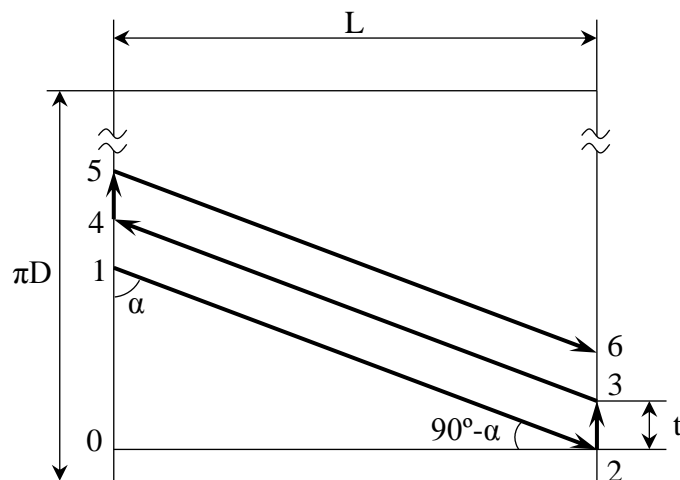


Рисунок 5.27 – Операционный эскиз программы О1. Развернутая на плоскости траектория движения инструмента по поверхности зеркала цилиндра

Угол подъема α формируемых винтообразных полос обеспечивает их взаимное перекрытие, оптимальную сплошность получаемого упрочненного слоя.

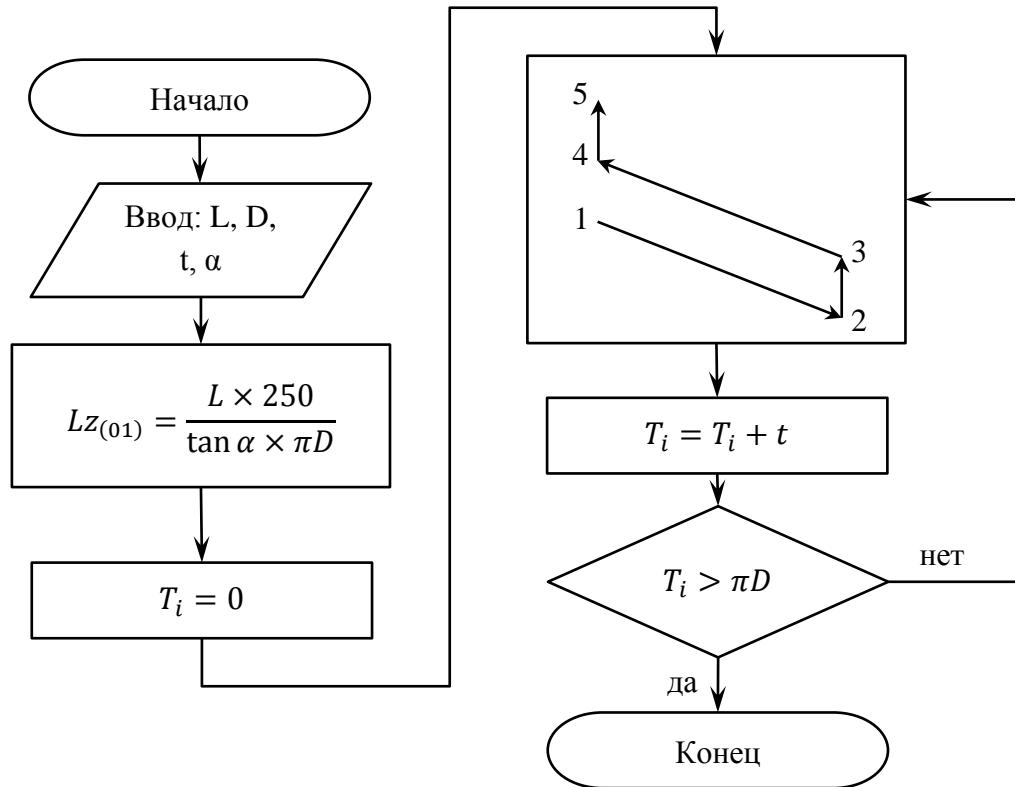


Рисунок 5.28 – Алгоритм программы O1

Характерный рисунок от траектории движения ЭИ (граница стыка первой и последней винтообразной строчки) после выполнения легирования по УП O1 можно наблюдать ниже (рис. 5.29). После выглаживания границу стыка определить, практически, невозможно.



Рисунок 5.29 – След от траектории движения ЭИ по программе O1

Программа O2 легирования сферических (либо плоских) поверхностей по спиральной (многозаходной) траектории (рис. 5.30). УП предназначена для легирования сферических поверхностей шатунов, коленчатых сочленений, торцов цилиндрических элементов. Код программы представлен в приложении 2.

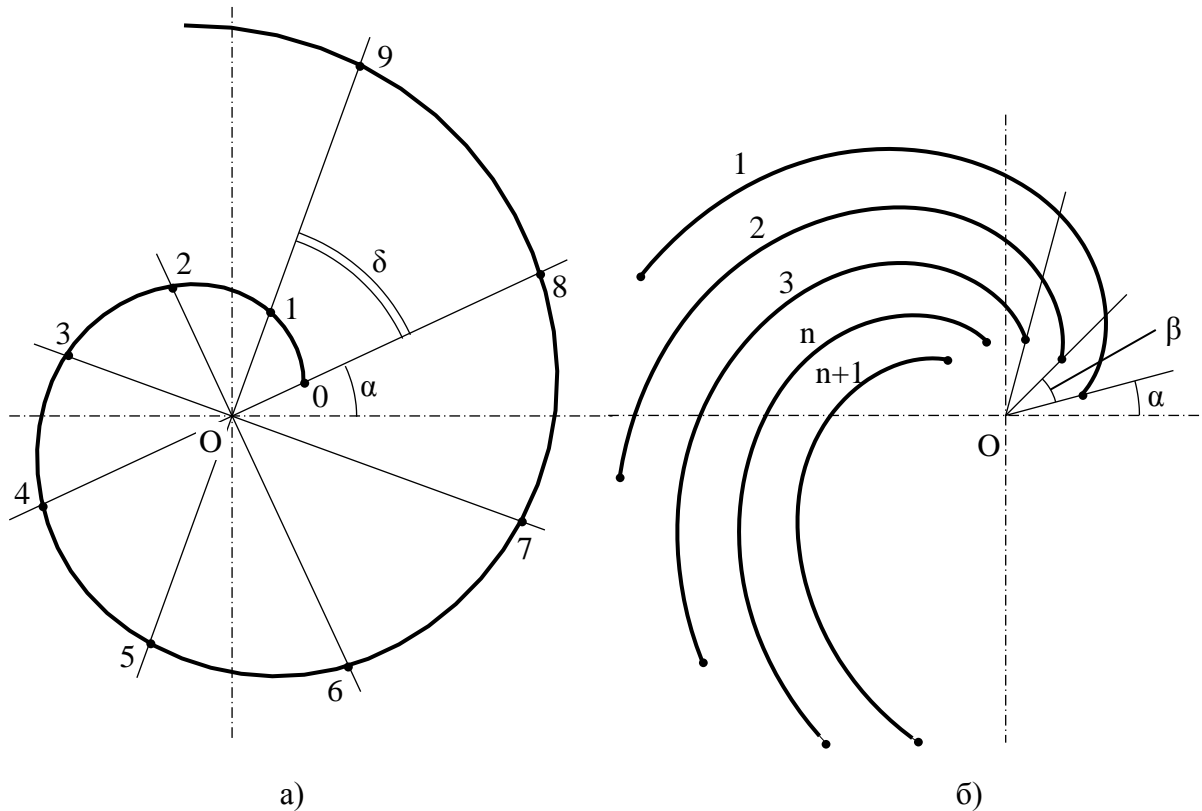


Рисунок 5.30 – Операционный эскиз программы O2: а) однозаходная спираль; б) многозаходная спираль

Основными переменными при программировании регистров ЧПУ являются: r , r' , k , α , β , δ . Обозначим расстояние от центра до точки начала спирали "0" (отрезок O-0) буквой r (рис. 5.30, а). Разность между величинами отрезков "O-1" и "O-0" обозначим через букву r' . Величина длины дуги "0-1" определяется переменной δ и вносится в регистр ЧПУ в градусах. Количество n полных витков спирали определяется как $n = k\delta/360$, где $360/\delta$ количество сегментов из которых состоит один виток, k – общее количество сегментов в спирали. Если необходимо завершить спираль не полным витком, то значение k/n будет дробным. Предварительное угловое смещение (поворот) спирали относительно своей оси "O" задаётся переменной α (рис. 5.30, б).

Так, если необходимо получить полтора витка с шагом равным 5 мм и величиной сегмента в 30° , воспользовавшись рассмотренными выше зависимостями, получим $k = 18$.

Нестандартный подход к параметризации траектории перемещения инструмента, а также перегруженность алгоритма программы переменными обусловлены изначальными

требованиями при разработке, а также применением данного кода для электроэрозионного фрезерования деталей на рассматриваемом оборудовании (рис. 5.31).

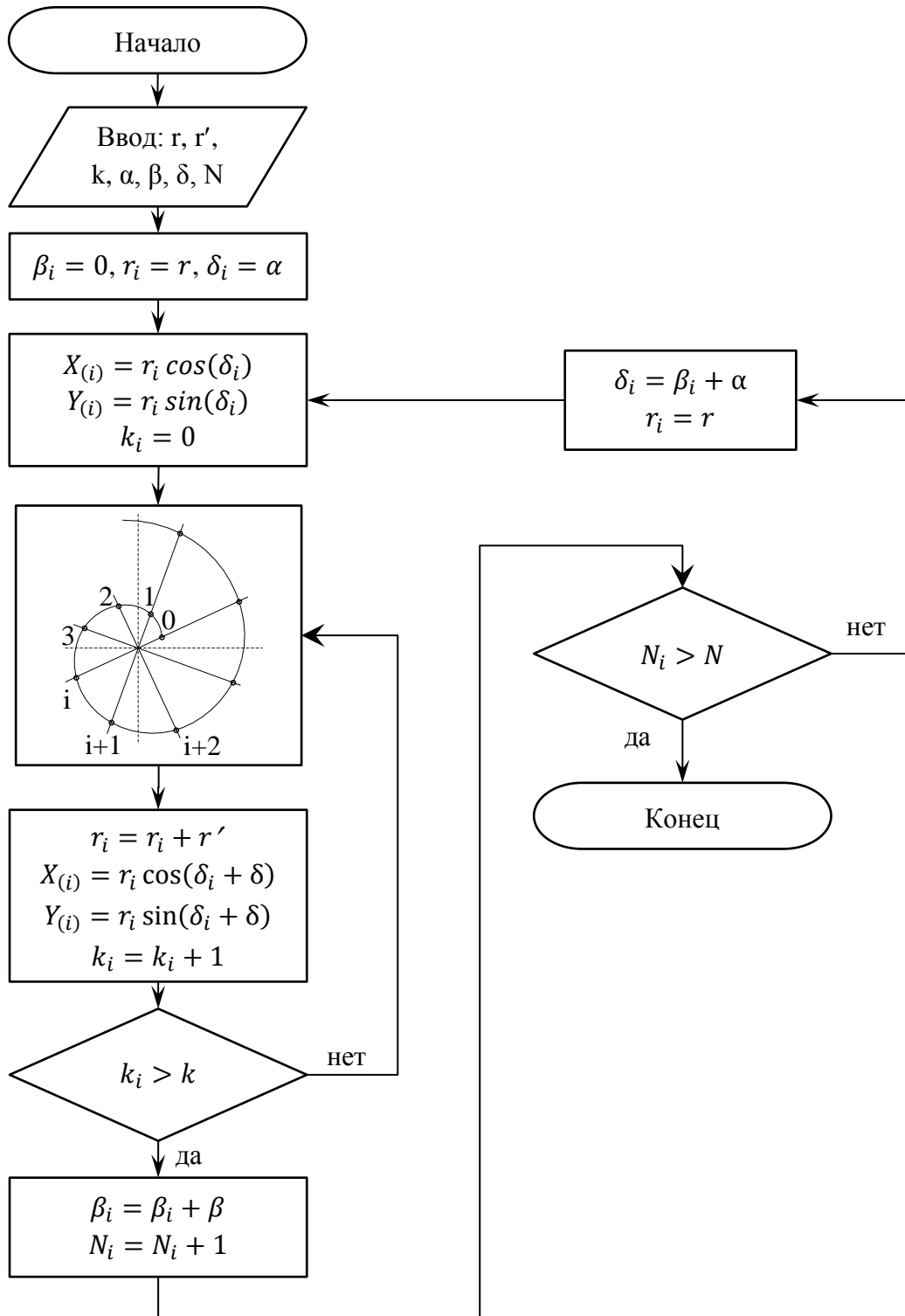


Рисунок 5.31 – Алгоритм программы O2

Гибкость и универсальность написанного программного кода позволили расширить применение УП и на процессы ЭИЛ.

5.5. Рекомендации по применению электроискрового упрочнения, легирования и комбинированного упрочнения

Представленные выше технологические методы упрочнения поверхностного слоя, восстановления и залечивания рабочих поверхностей находят реализацию в деталях различного назначения. Возможности нанесения антифрикционных покрытий, многослойное и многокомпонентное легирование, подготовка поверхностей к нанесению твердосмазочных покрытий, материалов, обеспечивающих триботехническую пару трения для узлов склонных к схватыванию, позволяют внедрять ЭИЛ и алмазное выглаживание на самых различных этапах производства. Как было показано выше, в некоторых случаях предлагаемые технологические мероприятия не требуют внесения изменений в действующий техпроцесс производства изделия.

В приповерхностных слоях титановых сплавов в процессе ЭИЛ происходит существенное увеличение контактной прочности и сопротивления изнашиванию. Причиной тому служит интенсивное их насыщение газами окружающей среды в процессе легирования и упрочнения.

Титан, обладая низкой теплопроводностью, способствует интенсивному выделению тепла в зоне легирования, что приводит к превалирующему характеру переноса материала между электродами в паровой фазе. В результате чего формируется ЛС с характерной структурой напыленного материала. Кроме того, обладая низким сопротивлением электрической эрозии, на титановые сплавы крайне сложно наносить тугоплавкие материалы (*Ta, Mo, Re, Nb, W* и др.). Было замечено, что на формирование состава ЛС, насыщение приповерхностных объемов металла газами, образование оксидов и нитридов металлов не так сильно оказывает влияние материал ЛЭ.

Карбооксидирование и последующее алмазное выглаживание позволяет в несколько раз повысить сопротивление износу рабочих поверхностей. При этом не жестких ограничений по требованиям шероховатости и геометрической точности обрабатываемых поверхностей. Происходит характерное пространственное (объемное) упрочнение волнистостей поверхности при условии соблюдения требований пробоя МЭП. Покрытие обладает удовлетворительной несущей способностью. Препятствует образованию задиров, а также схватыванию контртела с титановой поверхностью. Отсутствует необходимость в предварительной подготовки поверхности под ЛКО. Отсутствует необходимость в изоляции обрабатываемого участка на детали – ЛКО является локальным процессом.

В силу дискретного характера формирования ЛС, после алмазного выглаживания возможно образование поверхности с различными показателями микротвёрдости на разных

участках поверхности. Поэтому необходимо учитывать режимы и условия выглаживания при обработке покрытий с дискретными показателями микротвердости. Алмазное выглаживание покрытий, полученных на режимах с большими энергиями импульсов, приводит к сглаживанию только вершин неровностей. При этом достаточно сложно получить низкие значения шероховатости. Увеличение нагрузки на выглаживатель приводит к существенным пластическим передеформациям материала подвергнутого легированию и приповерхностных объемов материала подложки. Кроме того на «грубых» режимах ЭИЛ происходит существенная деградация сплошности и стабильности структуры образующегося покрытия.

На мягких режимах ЭИЛ, последующее выглаживание позволяет добиться полного сглаживания исходного профиля микронеровностей легированной поверхности с достижением значений шероховатости $Ra = 0,1$ мкм или несколько большей, в зависимости от твердостей подложки и ЛС. Представляет интерес обработка легированных поверхностей вибровыглаживанием для формирования регулярных микрорельефов.

Выводы по главе 5

1. Рассмотрена сфера применения процесса ЭИЛ в области повышения эксплуатационных свойств и восстановления деталей ГТД. Даны практические рекомендации.
2. Предложена технология упрочнения ГЦ ГТД. Разработан технологический процесс финишной операции нанесения износостойкого покрытия, с последующим алмазным выглаживанием на ГЦ различной номенклатуры.
3. Для проведения поэтапных мероприятий ЛКО и алмазного выглаживания, направленных на повышение ресурса ГЦ, были спроектированы и изготовлены соответствующее оборудование и приспособления.
4. Даны рекомендации по применению электроискрового упрочнения, легирования и комбинированного упрочнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы получены и обоснованы следующие результаты:

1. Проведен анализ научно-исследовательских разработок в области упрочнения и восстановления деталей ГТД и показано, что ЭИЛ и комбинированные способы на его основе являются эффективным средством позволяющим обеспечивать служебные свойства широкой номенклатуры изделий, выявлены основные направления развития технологий ЭИЛ в направлениях повышения качества упрочнения, определить направления и задачи исследований диссертационной работы.

2. Разработана феноменологическая модель ЭИЛ позволяющая прогнозировать элементный состав ЛС с учетом переноса материалов ЛЭ и подложки, а также вводимых в МЭП дополнительных компонентов.

3. Предложена методика расчета и прогнозирования остаточных напряжений в поверхностном слое после ЭИЛ методом конечных элементов. Предложен, исследован и обоснован метод снижения остаточных напряжений в тонкостенных элементах путем создания предварительного напряженного состояния.

4. Рассмотрены особенности обеспечения равномерности упрочнения при использовании дискового электрода применительно к обработке внутренних поверхностей вращения. Показано, что оптимальной является спиралевидная (возвратно–поступательная) траектория движения инструмента с углом наклона спирали, обеспечивающим взаимное перекрытие полос упрочненного материала.

5. Исследован процесс ЛКО титановых сплавов электродами из графита и углеродного волокна. Установлено влияние технологических факторов и условий процесса на состояние поверхностного слоя, антифрикционные свойства и износостойкость.

6. Разработана технология ЛКО зеркала ГЦ из титанового сплава ВТ20 с последующим алмазным выглаживанием. Предложенные технологические решения обеспечили технические требования по точности и микрогеометрии рабочей поверхности. Испытания, выполненные на технологическом изделии, показали, что износ зеркала за время наработки минимален, а его величина на порядок ниже, чем у цилиндров, обработанных по базовой технологии.

7. Спроектировано специальное оборудование для ЛКО серийных ГЦ изделий, позволяющее в полуавтоматическом режиме упрочнять детали различных типоразмеров.

8. Разработано программное обеспечение ЧПУ и комбинированного упрочнения типовых деталей и поверхностей.

9. Разработаны и зарегистрированы в Реестре программ для ЭВМ компьютерные программы, позволяющие на основе математических моделей рассчитать требуемые технологические параметры процесса ЛКО.

10. Результаты исследований диссертационной работы по технологиям ЭИЛ внедрены в учебный процесс в курсе лекций «Электрофизические и электрохимические процессы обработки», «Триботехника» в МАИ на кафедре «Технологии производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов».

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

ГТД	газотурбинный двигатель
ГЦ	гидроцилиндр
КВД	компрессор высокого давления
КНД	компрессор низкого давления
ЛКО	локальное карбоксилирование
ЛЭ	легирующий электрод
ЛС	легированный слой
МЭП	межэлектродный промежуток
МЭЗ	межэлектродный зазор
НА	направляющий аппарат
СВС	самораспространяющийся высокотемпературный синтез
ТИТ	(высококонцентрированный) точечный источник тепла
ТУ	технические условия
УП	управляющая программа
ЧПУ	числовое программное управление
ЭИ	электрод-инструмент
ЭИЛ	электроискровое легирование
ЭЭО	электроэрозионная обработка
CNC	computer numerical control (компьютерное числовое программное управление)
CVD	chemical vapor deposition (химическое осаждение из паровой фазы)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алов В.А., Епархин О.М., Куприянов И.Н., Соцкая И.М., Янчевский Ю.В.. Способ электроискрового упрочнения металлических поверхностей. Патент на изобретение RU 2355522 С1 МПК В23Н5/00 (2006.01). Опубликовано: 20.05.2009.
2. Астафьев Г.И., Файншмидт Е.М., Пегашкин В.Ф., Пилипенко В.В., Воротников В.И., Поломошнов П.Ю., Пилипенко В.Ф. Генератор импульсов для электроискрового легирования. Патент на полезную модель RU 83206U1 МПК В23Н1/02 (2006.01). Опубликовано: 27.05.2009.
3. Астафьев Г.И., Файншмидт Е.М., Пегашкин В.Ф., Пилипенко В.В., Воротников В.И., Поломошнов П.Ю., Пилипенко В.Ф., Созинова М.В. Высокоуглеродистый электрод для электроискрового легирования. Патент на полезную модель RU 85846 U1 МПК В23Н7/12 (2006.01), В23Н7/18 (2006.01). Опубликовано: 20.08.2009.
4. Беляков А.В., Шапин В.И., Горбачев А.Н. Практика формирования электроискровых покрытий для упрочнения и восстановления лопаточного аппарата проточной части паровых турбин тепловых и атомных электростанций // Вестник ИГЭУ. Вып. 4, 2008. С. 1-9.
5. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: МАШГИЗ. 1963. 232 с.
6. Бойцов А.Г. Комбинированное электроэрозионное упрочнение ответственных деталей авиационной техники. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва. 1994.
7. Верхотуров А.Д. Обобщенная модель процесса электроискрового легирования // Электрофизические и электрохимические методы обработки. 1983. №1. С. 3-6.
8. Верхотуров А.Д., Муха И.М. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. Киев: Техника, 1982. 181 с.
9. Верхотуров А.Д., Гордиенко П.С., Подчерняева И.А. [и др.]. Создание защитных покрытий на вольфрамосодержащих твёрдых сплавах электроискровым легированием металлами и боридами // Перспективные материалы. 2010. №4, С. 88-94.
10. Верхотуров А.Д., Егоров Ф.Ф., Ипполитов Е.Г., Карюк Г.Г., Подчерняева И.А., Сухих Л.Л., Чиплик В.Н. Порошковый электродный материал на основе бориды тугоплавкого металла для электроискрового легирования стали. Патент на изобретение SU 1149641 А1 МПК С22С29/14, Н01Н1/02. Опубликовано: 10.09.1999.

11. Влияние вторичной электроискровой обработки углеродсодержащими материалами на свойства титановых сплавов / А.В. Стрелец, И.А. Коломиец, Е.А. Левашов, А.Е. Кудряшов, Ж.В. Еремеева // *Металлург.* № 9. 2009.
12. Влияние электроискровой упрочняющей обработки на износ разделительных штампов / В.С. Хронусов, Б.П. Сиротенко // *Вестник машиностроения.* 1987. № 2. С. 53-55.
13. Влияние электроискрового легирования поверхности молибдена и ниобия на термоэлектродную эмиссию / Ю.М. Горячев, Л.П. Исаева, Н.И. Симан // *Электронная обработка материалов.* 1987. № 4. С. 12-15.
14. Влияние электроискрового легирования на жаростойкость сталей / А.Д. Верхотуров, И.А. Пансюк [и др.] // *Порошковая металлургия.* 1988. № 3. С. 69-75.
15. Влияние электроискрового легирования на кавитационное изнашивание сталей / В.А. Косенко, А.И. Некоз, А.В. Паустовский [и др.] // *Проблемы трения и изнашивания.* Киев: 1986. № 30. С. 44-46.
16. Влияние одноосного статического нагружения электродов на процесс электроискрового легирования / Н.Я. Парканский, Р.Г. Догадько, Н.И. Мораль [и др.] // *Электронная обработка материалов.* 1987. № 5. С. 21-23.
17. Восстановление деталей машин: Справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов; Под ред. В.П. Иванова. М.: Машиностроение. 2003. 672 с.
18. Гадалов В.Н., Самойлов В.В., Лыткин А.И. Электроискровые покрытия из самофлюсующихся материалов на никельхромовой основе на быстрорежущей стали // *Фундаментальные исследования.* № 5. 2009.
19. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безизносность). Учебник. - 4-е изд., перераб. и доп. М.: МСХА. 2001. 616 с.
20. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., [и др.]. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Издательство "Штиинца", 1985. 197 с.
21. ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. М., 1988.
22. ГОСТ 23597-79. Станки металлорежущие с числовым программным управлением. Обозначение осей координат и направлений движений. М., 2006.
23. Гото Акихиро, Акиёси Масао, Мацуо Кацухиро, Отиаи Хироюки, Ватанабе Мицутоси, Фурукава Такаси. Электрод для электроразрядной обработки поверхности, способ электроразрядной обработки поверхности и устройство для электроразрядной обработки поверхности. Патент на изобретение RU 2325468 С2 МПК С23С26/00 (2006.01), В22F5/00 (2006.01). Опубликовано: 27.05.2008.
24. Грачев М.В., Денисов Л.В., Бойцов А.Г. Фазовый и элементный состав поверхностного слоя после электроискрового легирования // *Труды ГОСНИТИ.* 2010. Т. 106. С. 47-49.

25. Двигатель АЛ-31ФП. Руководство по технической эксплуатации. 96ФП. РЭ1 96-А/АМР-00-Р. ОАО "НПО Сатурн" Научно-технический центр им. А. Льюльки. 2004. 2035 с.
26. Денисов Л.В. Моделирование процесса формирования легированного слоя при электроразрядной обработке // Сб.: XXXIII Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 8 томах. Москва, 3–7 апреля 2007г. 2007. Т. 2. С. 59-60.
27. Денисов Л.В. Модель переноса материалов и формирования легированного слоя при электроэрозионном упрочнении. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011618718 / заявка №2011616890; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 ноября 2011г.
28. Денисов Л.В. Влияние межэлектродной среды на процесс формирования легированного слоя при электроразрядном упрочнении // Сб.: XXXIV Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 8 томах. Москва, 1–5 апреля 2008г. 2008. Т. 2. С. 47-48.
29. Денисов Л.В. Упрочнение титановых сплавов электроискровым легированием графитовыми электродами // Сб.: XXXIX Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 томах. Москва, 9–13 апреля 2013г. 2013. Т. 2. С. 37-38.
30. Денисов Л.В., Бойцов А.Г. Влияние технологических режимов электроразрядной обработки на формирование легированного слоя // Научные труды МАТИ. Вып. 14 (86). 2008. С. 181-186.
31. Денисов Л.В., Бойцов А.Г. Исследование влияния факторов электроразрядной обработки по формированию напыляемого слоя на детали ГТД // Научные труды МАТИ. Вып. 13 (85). 2007. С. 117-121.
32. Денисов Л.В., Бойцов А.Г. Многослойное и многокомпонентное легирование для повышения качественных характеристик защитных покрытий // Сб.: Новые материалы и технологии – НМТ–2010. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Москва, 16–18 ноября 2010г. В 3 томах. 2010. Т. 2. С. 11.
33. Денисов Л.В., Бойцов А.Г. Нанесение многослойных и многокомпонентных покрытий на детали из титановых сплавов электроискровым легированием // Научные труды (Вестник МАТИ). Вып. 20 (92). 2013. С. 158-162.
34. Денисов Л.В., Бойцов А.Г. Области применения защитных комбинированных покрытий при эксплуатации высоконагруженных деталей летательной техники // Научные труды МАТИ. Вып. 16 (88). 2009. С. 117-122.

35. Денисов Л.В., Бойцов А.Г. Исследование возможностей электроразрядной обработки по восстановлению деталей ГТД // Научные труды МАТИ. Вып. 10 (82). 2006. С. 123-128.
36. Денисов Л.В., Бойцов А.Г., Силуянова М.В. Комбинированное упрочнение рабочих поверхностей гидроцилиндров, применяемых в авиационных двигателях. // СТИН. 2018. Вып. 7. С. 33-36.
37. Денисов Л.В., Бойцов А.Г., Силуянова М.В. Обеспечение эксплуатационных свойств деталей и узлов ГТД локальным поверхностным легированием. // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 2. С. 58-67.
38. Денисов Л.В., Грачев М.В., Пискарев А.С. Программа генерирования управляющего кода для FANUC 3M ЧПУ систем на основе двумерного чертежа формата DXF. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614432 / заявка № 2010612656; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 7 июля 2010г.
39. Денисов Л.В., Прытков А.В. Исследование влияния электроэрозионного упрочнения на антифрикционные свойства поверхностей // Сб.: Новые материалы и технологии – НМТ–2006. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Москва, 21–23 ноября 2006г. В 3 томах. Т. 2. 2006. С. 37-38.
40. Денисов Л.В., Пискарев А.С., Бойцов А.Г. Влияние предварительно напряженного состояния на особенности формирования остаточных напряжений в поверхностном слое при электроискровом легировании // Научные труды (Вестник МАТИ). Вып. 21 (93). 2013. С. 188-195.
41. Денисов Л.В., Пискарев А.С., Бойцов А.Г. Локальное карбоксицирование титановых сплавов // Упрочняющие технологии и покрытия. Вып. 8. 2014. С. 24-29.
42. Замулаева Е.И. Разработка наноструктурированных электродов и покрытий на основе WC-Co // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2009.
43. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. Перевод с английского. Под редакцией Б.Е. Победри. Москва, 1975.
44. Золотых Б.Н. Физические основы электроискровой обработки металлов. 1953. 108 с.
45. Золотых Б.Н. Основные вопросы качественной теории электроискровой обработки в жидкой диэлектрической среде // Проблемы электрической обработки материалов. 1962. С. 5-43.
46. Интенсификация процесса электроискрового легирования в среде легкоплавких поверхностно активных металлов / Н.Г. Мещеряков, Н.В. Чаругин // Электронная обработка материалов. 1987. № 1. С. 33-38.

47. Использование электроискрового легирования для повышения износостойкости рабочей части разделительных штампов / Б.А. Тимошенко // Кузнечно-штамповочное производство. 1979. № 12. С. 13-14.
48. Использование электроискровой металлизации при получении комплексных силицидных покрытий / Е.Г. Сосновская, Е.А. Зайцев // Защитные покрытия на металлах. 1983. № 7. С. 61-64.
49. К вопросу о расчете эрозионной стойкости электродов инструментов при электроэрозионной обработке / М.Ш. Отто, В.А. Шестеркин // Электронная обработка материалов. 1986. № 6. С. 18-20.
50. Кинетика разрушения покрытий при электроискровом легировании / Н.Я. Парканский, М.Ц. Кац // Электронная обработка материалов. 1982. № 3. С. 20-23.
51. Коваленко В.С., Верхотуров А.Д., Головкин Л.Ф., [и др.]. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов. 1986. 276 с.
52. Коррозионная стойкость титана ВТ10 с электроискровыми покрытиями / В.Е. Блащук, Г.И. Боев, Л.М. Оноприенко, Р.К. Мелехов // Вестник машиностроения. 1987. № 9. С. 42-44.
53. Красновский С.Я. Разработка технологии повышения износостойкости рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин методом электроискрового легирования // Вестник ИГЭУ. Вып. 2. 2009.
54. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Современный уровень развития электроискровой обработки металлов и некоторые научные проблемы в этой области // Электроискровая обработка металлов. Вып. 1. 1957. С. 9-37.
55. Лазаренко Н.И. О механизме образования покрытий при электроискровом легировании металлических поверхностей // Электронная обработка материалов. 1965. № 1.
56. Лазаренко Н.И. Современный уровень и перспективы развития электроискрового легирования металлических поверхностей // Электронная обработка материалов. 1967. № 5.
57. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электрическая эрозия материалов. Л.: Госэнергоиздат, 1944.
58. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Физика электроискрового способа обработки материалов. М.: ЦБТИ Министерства электропромышленности, 1946. С. 76.
59. Ледков Е.А., Химухин С.Н., Давыдов В.М., Гиль А.В., Кочетова И.В. Устройство для подсчета количества искровых процессов и автоматической корректировки параметров электроискрового легирования. Патент на полезную модель RU 85633U1 МПК G01B7/00 (2006.01). Опубликовано: 10.08.2009.

60. Математическая модель состояния электроэрозионного промежутка / А.В. Патси, А.М. Протасов // Электронная обработка материалов. 1984. № 4. С. 11-13.
61. Руководство по эксплуатации и ремонту авиационных подшипников качения. А.М. Зайцев, В.Е. Желтовский, В.П. Першин. Москва. 1976.
62. Моделирование релаксации напряжений в условиях термического всплеска, индуцированного импульсом тока / Г.А. Цхондия // Вестник МАИ. 2010. Т 17. № 5. С. 219-224.
63. Мулин Ю.И. Технологические и методологические основы формирования функциональных покрытий методом электроискрового легирования с применением электродных материалов из минеральных концентратов дальнего востока // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Комсомольск-на-Амуре. 2007.
64. Мулин Ю.И. Устройство для электроискрового легирования. Патент на изобретение RU 2245767C1 МПК В23Н1/02. Опубликовано: 10.02.2005.
65. Намитоков К.К. К вопросу о возникновении и развитии низковольтных разрядов // Электронная обработка материалов. 1963. С. 44-55.
66. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления. М.: Энергия, 1978. 456 с.
67. Научно-технические технологии машиностроительного производства. Физико-химические методы и технологии: учебное пособие / Ю.А. Моргунов, Д.В. Панов, Б.П. Саушкин, С.Б. Саушкин; под ред. Б.П. Саушкина. М.: ФОРУМ, 2013. 928 с.
68. Некоторые вопросы чистового электроискрового легирования медицинского инструмента / С.П. Фурсов, А.М. Парамонов, А.К. Вафини [и др.] // Vortragsr. ВU. Ilmenau, 1986. С 19-22.
69. Некоторые результаты исследований физики электроэрозионного нанесения покрытий / Б.А. Сребров, З.И. Владкова // Международный симпозиум по электрическим методам обработки ISEM8. Сб. докладов. Внешторгиздат, 1986. С. 174-179.
70. Немилов Е.Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. Л.: Машиностроение. 1989. 164 с.
71. Николенко С.В., Коваленко С.В., Куценко В.С., Баранов В.А., Сундуков А.М. Устройство для электроискрового легирования. Патент на изобретение RU 2146581 С1 МПК В23Н9/00. Опубликовано: 20.03.2000.
72. О механизме эрозии металлов при электроискровом легировании / В.И. Жура, В.В. Юхненко // Электронная обработка материалов. 1981. № 1. С. 29-31.
73. Об ограничении толщины слоев формируемых в процессе электроискрового легирования / А.Е. Гитлевич [и др.] // Электронная обработка материалов. 1981. № 3. С. 25-29

74. Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов: Учебное пособие для студентов авиац. спец. вузов. М.: Высшая школа. 1985. 392 с.
75. Орлов К.Я., Пархимович В.А., Ремонт самолетов и вертолётов: Учебник для авиац. училищ. М.: Транспорт, 1986. 295 с.
76. Особенности электроискрового упрочнения инструмента на установке ЕЛФА / В.Н. Карпухин, В.И. Ливурдов, А.Г. Язев // Электронная обработка материалов. 1987. № 5. С. 83-86.
77. Особенности массопереноса электродных материалов в условиях металлического контакта при электроискровом легировании / В.И. Жура, С.Б. Викелич, В.Я. Нерода // Электронная обработка материалов. 1983. № 4. С. 26-29.
78. Отиаи Хироюки, Ватанабе Мицутоси, Урабе Тацудо, Соуно Казуо, Гото Акихиро, Акийоси Масао. Способ восстановления компонента машины, способ изготовления восстановленного компонента машины, способ изготовления компонента машины, газотурбинный двигатель, электроэрозионный станок, способ восстановления компонента турбины и способ изготовленного компонента турбины. Заявка на изобретение RU 2006100299А МПК C23C26/00 (2006.01). Дата публикации: 27.06.2006.
79. Отиаи Хироюки, Ватанабе Мицутоси, Фурукава Такаси, Оотера Иссеи. Способ обработки поверхности и способ ремонта. Патент на изобретение RU 2365677 С2 МПК C23C26/00 (2006.01), В23Р6/00 (2006.01), В23Н9/00 (2006.01), F01D5/28 (2006.01). Опубликовано: 27.08.2009.
80. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностей поверхностно-пластическим деформированием. М.: Машиностроение. 1978. 152 с.
81. Папшев Д.Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками. М.: Машиностроение. 1968. 132 с.
82. Погожев Ю.С. Дисперсноупрочненные наночастицами электродные материалы и покрытия на основе карбида титана // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2006.
83. Пенкин Н.С., Пенкин А.Н., Сербин В.М. Основы трибологии и триботехники: учебное пособие. М.: Машиностроение. 2008. 206 с.
84. Перспективы развития технологии и оборудования для электроискрового легирования / В.А. Снежков, А.Д. Верхотуров, А.Н. Краснов, Ю.В. Полоскин // Защитные покрытия на металлах. 1982. N 16. С. 65-68.
85. Повышение долговечности деталей совмещенным упрочнением / О.И. Зубаченко, В.Б. Марголин, В.П. Оноприенко [и др.] // Вестник машиностроения. 1986. № 8. С. 65-67.

86. Повышение износостойкости электроискровых покрытий / А.Д. Верхотуров, И.А. Подчерняева, Л.П. Половцев [и др.] // Порошковая металлургия. 1987. № 5. С. 94-98.
87. Применение электроискровой обработки для повышения долговечности деталей пятниковых узлов большегрузных вагонов / А.С. Шульга // Технология и автоматизация машиностроения. 1983. № 32. С. 113-114.
88. Перспективы применения электроискрового легирования для повышения долговечности деталей ДВС изготовленных из алюминиевых сплавов / М.С. Дигам, А.Н. Шалай, Ю.А. Попченко // Двигателестроение. 1988. № 10. С. 19-23.
89. Процессы механической и физико-химической обработки в производстве авиационных двигателей: Учебное пособие / А.Г. Бойцов, А.П. Ковалев, А.С. Новиков [и др.]. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2007. 584 с.
90. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: Справочник / В.И. Мяченков, В.П. Мальцев, В.П. Майборода [и др.]: Под общ. ред. В.И. Мяченкова. М.: Машиностроение. 1989. 520 с.
91. Сарилов М.Ю. Повышение эффективности электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Комсомольск-на-Амуре. 2008.
92. Сварка разнородных металлов. В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин, Р.С. Курочко, Л.Г. Стрижевская. М.: Машиностроение. 1984. 239 с.
93. Сегерлинд Л.Д. Применение метода конечных элементов. М.: Мир. 1979.
94. Создание адгезионно-прочных алмазных покрытий на твердом сплаве методом электроискрового легирования / Е.В. Азарова, Е.А. Левашов, В.Г. Ральченко, А.П. Большаков, Е.Е. Ашкинази // Металлург. 2010. № 8. С. 51-55.
95. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Жаропрочные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1976. 448 с.
96. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов / Л.Я. Попилов. 1971. 544 с.
97. Справочник по сварке цветных металлов / С.М. Гуревич. Киев: Наукова думка. 1981. 607 с.
98. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г.Л. Амитан, И.А. Байсупов, Ю.М. Барон, [и др.]. Под общ. ред. В.А. Волосатова. Л.: Машиностроение. 1988. 719 с.

99. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин // В сб. Поверхностный слой, точность и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов. М.: МДНТП, 1980. С. 313.
100. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей: Учеб. Пособие. / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, К.А. Малиновский, В.Г. Попов. М.: Высш. шк.; 2002. 355 с.
101. Тимощук Т.А., Купцов С.Г., Фоминых М.В., Мухинов Д.В. Шихта для изготовления электрода для электроискрового легирования. Патент на изобретение RU 2280093 С2 МПК С22С29/02 (2006.01), С23С26/00 (2006.01). Опубликовано: 20.07.2006.
102. Увеличение износостойкости деталей литейной оснастки методом электроискрового легирования / Н.В. Чаругин, Б.Н. Бирюков, В.Ф. Свердшковский // Технология и организация производства. Киев. 1984. № 1. С. 50-52.
103. Уланов И.М., Фалеев В.А. Устройство для электроэрозионного нанесения покрытий ферромагнитными порошками. Патент на изобретение SU 1352769 А1 МПК В23Н9/00. Опубликовано: 09.08.1995.
104. Управление процессом ЭИЛ вследствие пластифицирующего воздействия на металл ионизирующего гамма-излучения / Г.И. Мещеряков, Н.В. Чаругин // Тезисы докладов Всесоюзной конференции по импульсным методам обработки материалов. Минск. 1978. С. 94.
105. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А.Г. Бойцов, В.Н. Машков, В.А. Смоленцев, Л.А. Хворостухин. М.: Машиностроение. 1991. 144 с.
106. Физико-химические основы создания электродных материалов для электроискрового легирования / А.Д. Верхотуров, И.А. Подчерняева // Электронная обработка материалов. 1987. № 5. С. 11-14.
107. Формирование вторичной структуры на аноде в процессе электроискрового легирования / А.Д. Верхотуров, И.А. Подчерняева [и др.] // Электронная обработка материалов. 1987. № 1. С. 26-32.
108. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение. 1980. 184 с.
109. Чечулин Б.Б., Ушков С.С., Разуваева И.Н. [и др.]. Титановые сплавы в машиностроении. Л.: Машиностроение. 1977.
110. Шабров Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. Л.: Машиностроение, 1983. 212 с.
111. Электроискровое покрытие бронзами стальных шарнирных узлов / Е.И. Мягков, Ю.Д. Подзеев // Вестник машиностроения. 1980. № 11. С. 60-61.

112. Коваленко В.С. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. 1975. 236 с.
113. Электрохимические и коррозионные свойства Ст45 легированной электроискровым способом / Р.А. Стурза, А.М. Романов, В.Э. Ненно [и др.] // Электронная обработка материалов. 1984. № 4. С. 54-57.
114. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / Ю.С. Елисеев, Б.П. Саушкин, под ред. Б.П. Саушкина. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 437 с.
115. Электроискровые покрытия на основе ZrN на стали У8 после обработки концентрированным солнечным излучением / О.В. Паустовский, В.В. Пасичный, В.И. Новикова, Н.М. Мордовец, Л.П. Исаева, С.А. Остапенко. *Functional materials*. №3 (2008). С 429-432.
116. A different constructive elaboration of a device for the alloying and electro-spark deposition / Alexandru Rădeanu, Valentin Lupu, Dumitru Uliuliuc // *Academic journal of manufacturing engineering*. 2010. Vol. 8.
117. Alan Juneau, Daniel Lecuyer, Alan Bouthillier. Oxidation protected blade and method of manufacturing. U.S. Patent No.: US 2007/0141965 A1. Pub. Date: Jun. 21, 2007.
118. Assessment of electrospark deposition technology for U.S. navy component repair applications. Denise Aylor // NSWC Carderock Division. Mega Rust Conference 2006. 12-15 June 2006.
119. Coatings on resistance welding electrodes to extend life / Z. Chen, Y. Zhou, Nigel Scotchmer // SAE International. 2005.
120. Corrosion behavior of zirconium diboride-based ceramics and electrospark coatings in 3% NaCl solution / V.A. Lavrenko, V.N. Talash, I.A. Podchernyaeva, A.D. Panasyuk, V.M. Panashenko, D.V. Yurechko // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2007. Vol. 46.
121. Development of metastable solidification structures using the electrospark deposition process / M. Brochu, J.G. Portillo, J. Milligan, D.W. Heard. // *The Open Surface Science Journal*, 2011. №3. 105-114.
122. Electrospark deposition: Mass transfer. Orhan Sahin and Alexandre V. Ribalko // *Mass transfer – Advanced aspects*. 2011.
123. Effect of pulse duration and size of interelectrode interval on electrospark spraying. II. Effect of pulse duration and size of interelectrode interval on composition and mechanical properties of coatings / V.D. Belik, R.V. Litvin, M.S. Kovalchenko, A.A. Rogozinskaya // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2007. Vol. 46.
124. Effect of electrode material on formation of electrospark coatings on cutting tools and equipment parts / V.I. Shemegon // *Metal Science and Heat Treatment*. 2007. Vol. 49.

125. Effect of electrospark alloying a tungsten hard alloy on its wear and corrosion resistance / L.A. Podchernyaeva, A.D. Panasyuk, V.A. Lavrenko, A.L. Yuga, V.L. Berezanskaya // Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 1999. Vol. 38.
126. Effect of secondary electrospark treatment with carbon-bearing materials on the properties of titanium alloys / A.V. Strelets, I.A. Kolomiets, E.A. Levashov, A.E. Kudryashov, Zh.V. Eremeeva // Metallurgist. 2009. Vol. 53.
127. Effect of the electrospark alloying regime on the durability of high-speed steel R6M5K5 cutters / M.S. Koval'chenko, A.V. Paustovskii, V.P. Botvinko, A.P. Tamarov // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 1998. Vol. 37.
128. Electrospark deposition for the repair of army main battle tank components. Victor Champagne, Marc Pepi, Brian Edwards. Army Research Laboratory. Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5069. 2006. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/265189237_Electrospark_Deposition_for_the_Repair_of_Army_Main_Battle_Tank_Component (дата обращения: 05.09.2018)
129. Electrospark deposition for die repair / J. Tušek, L. Kosec, A. Lešnjak, T. Muhič // Metalurgija. 2012. № 1 (51), P 17-20.
130. Electrospark deposition for depot- and field-level component repair and replacement of hard chromium plating. U.S. Department of Defense. Environmental security technology certification program. Cost and performance report (WP-0202). 2006. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.serdp-estcp.org/content/download/5776/79338/file/WP-0202-FR.pdf> (дата обращения: 05.09.2018)
131. Exchange of experience. Effect of electrode porosity on the electrospark deposition of recovery coatings / S.M. Kirilenko, O.V. Paustovskii, M.V. Karpets // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2011. Vol. 50.
132. Exchange of experience and information electrospark and laser alloying of medical instruments made of 40X13 steel / L.A. Podchernyaeva // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 1998. Vol. 37.
133. Experimental investigations of the Cu-Mo and Cu-Ti electrospark coatings modified by laser beam / Norbert Radek // Advances in manufacturing science and technology. 2008. Vol. 32.
134. Hu, Yiping, Taylor, Clyde R., Bye, Richard L. Hybrid welding repair of gas turbine superalloy components. European Patent Application. EP 1 884 306 A1. Date of publication: 06.02.2008 Bulletin 2008/06.
135. Jeffrey A. Bailey, Roger N. Johnson, Walter R. Park, John T. Munley. Method and apparatus for electrospark deposition. U.S. Patent No.: US 6 835 908 B2. Date of Patent: Dec. 28. 2004.

136. Jean-Christophe Brachet, Christine Chabert, Patrick Olier, Stephane Urvoy. Erbium-containing zirconium alloy, methods for preparing and shaping the same, and structural component containing said alloy. United States Patent No.: US 2010/0040189 A1. Pub. Date: Feb. 18, 2010.
137. Jianwu Yu. Electrospark deposition-based preparation method of diamond abrasive particle layer. Publication No. CN 102251206. A published on 23-Nov-2011.
138. Laws of formation of electrospark coatings from alloys of the Ni–Cr–Al–Y system / A.V. Paustovskii, R.A. Alfintseva, T.V. Kurinnaya, V.V. Pogorelaya, S.N. Kirilenko, A.D. Kostenko // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2004. Vol. 43.
139. Materials transfer in electro-spark deposition of TiC_p/Ni metal-matrix composite coating on Cu substrate / S.K. Tang, T.C. Nguyen, Y. Zhou // Welding Research. 2010. Vol. 89.
140. Microcrystalline coatings deposited by series double-pole electro-pulse discharge and its high-temperature oxidation behavior / Xu Qiang, He Yedong, Wang Deren, Qi Huibin, Li Zhengwei & Gao Wei // Science In China (Series E). 2002. Vol. 45.
141. Michael W. Hixson, Robert E. Shepler, Billie W. Bunting. Method of repairing a turbine engine component. U.S. patent application publication. Pub. No.: US 2009/0056096 A1. Pub. Date: Mar. 5, 2009.
142. Modification of the surface of molybdenum by electrospark alloying using a composite electrode of the Al–Ti(Zr)–N–B system / I.A. Podchernyaeva, V.A. Lavrenko, A.D. Panasyuk, M.A. Teplenko, I.I. Timofeeva, V.S. Kravchenko, A.I. Bloshchanevich // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2003. Vol. 42.
143. Naval materials science and technology for corrosion control. David A. Shifler. U.S. Navy and industry corrosion technology exchange - Rust 2004. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sae.org/events/dod/presentations/2006airanjperez.pdf> (дата обращения: 05.09.2018)
144. New Composite Multifunctional Coatings Produced Using SHS-Electrodes. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.istc.int/en/project/7423B8A7DF8CBC75C3256AEF0043FD34> (дата обращения: 05.09.2018)
145. Powder materials, parts and coatings. Electrospark alloying followed by laser treatment of high-speed steel cutting tools / M.S. Koval'chenko, A.V. Paustovskii, V.P. Botvinko, and A.P. Tamarov // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 1996. Vol. 35.
146. Preparation and mechanical properties of two nickel base alloy coatings achieved by electrospark deposition / Ping Zhang, Lin Ma, Zhijie Liang and Junjun Zhao // Acta Metallurgica Sinica. (English Letters). 2011. Vol. 24. № 4. P 309-314.
147. Process and properties of TiC_{0.7}N_{0.3}-based cermet coating deposition on steel by electrospark deposition technique / K. Korkmaz, H.I. Bakan.// Kovove Mater. 2010. № 48.

148. Processes and properties of deposits in electrospark deposition / A. Lesnjak, J. Tusek // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2002. Vol. 7.
149. Refractory and ceramic materials mass transfer and adhesion in electrospark alloying of AL9 alloy with $\text{AlN-Ti(Zr)B}_2\text{-Ti(Zr)Si}_2$ ceramic electrodes / I.A. Podchernyaeva, D.V. Yurechko, A.D. Panasyuk, M.A. Teplenko // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2004. Vol. 43.
150. Ren Jin. Automatic electrospark deposition processing gun. Publication No. CN 101850447. A published on 06-Oct-2010.
151. Results of materials testing for electrospark deposition. Advanced Surfaces and Processes, Inc. HCAT Program Review Meeting. Hilton San Diego Resort. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/301221116/download> (дата обращения: 05.09.2018)
152. Repair heavy-duty generator rotor shaft by electro spark deposition process / Wang Ruijun, Wang Weiping, Lü Yufen, Tian Hehong // *Transactions of JWRI*. 2010. No. 2. Vol. 39.
153. Surface modification of resistance welding electrodes by electro-spark deposited coatings / Zheng Chen, Nigel Scotchmer, Norman Zhou // *Materials Science & Technology*. 2006. Vol. 201.
154. The microstructure and properties of cast titanium alloy Ti-5553 were evaluated in a joint program by Howmet and Boeing. Stewart Veeck, David Lee, Rodney Boyer, Robert Briggs. *Advanced materials & processes*. 2004. P 47-49.
155. Theory, manufacturing technology, and properties of powders and fibers. Electrospark powders of shape memory alloys / G.E. Monastyrskii, Yu.N. Koval', A.P. Shpak, R.Ya. Musienko, V.I. Kolomytsev, A.A. Shcherba, S.N. Zakharchenko, P.G. Yakovenko // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2007. Vol. 46.
156. TiB_2/Ni coatings on surface of copper alloy electrode prepared by electrospark deposition / Luo Cheng, Xiong Xiang, Dong Shi-jie // *Transactions Nonferrous Metals Society of China*. 2011. № 21. P 317-321.
157. Wear-resistant layered electrospark coatings based on ZrB_2 / I.A. Podchernyaeva, O.N. Grigor'ev, V.I. Subbotin, A.D. Kostenko, L.P. Isaeva, E.A. Artemenko // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2004. Vol. 43.
158. Wear resistance of a plasma-electrospark zirconium diboride-based coating on aluminum alloy D16T / I.A. Podchernyaeva, A.D. Panasyuk, O.N. Grigor'ev, D.V. Yurechko, V.V. Varyukhno, A.M. Bloschanevich // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2007. Vol. 46.
159. ZrN coatings on U8 steel obtained by electrospark alloying after a concentrated solar irradiation / A.V. Paustovsky, V.V. Pasichny, V.I. Novikova, N.M. Mordovets, L.P. Isaeva, S.A. Ostapenko // *Functional Materials*. 2008. No. 3.



**Опытно-конструкторское
Бюро имени А. Люльки**



«Опытно-конструкторское бюро имени А. Люльки» («ОКБ им. А. Люльки»)
филиал ПАО «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение»
ул. Касаткина, 13, г. Москва, Российская Федерация, 129301
Тел.: +7(495) 783-01-11, факс: +7(495) 683-09-97, 686-75-66, <http://www.umpro.ru>, e-mail: okb@okb.umpro.ru
ОГРН 1020202388359, ИНН 0273008320, КПП 771643001

№ _____
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный конструктор-директор

«ОКБ им. А. Люльки»

Е.Ю. Марчуков

«06» 09 2018 г.

АКТ

о внедрении результатов, кандидатской диссертационной работы

Денисова Леонида Владимировича

в ОКБ им. А.М. Люльки

«06» 09 2018 г.

Комиссия в составе:

Председатель:

Зам. генерального конструктора

Зубарев Г.И.

Члены комиссии:

Вед. конструктор по изделиям

Ельтищев Е.М.

Нач. отдела 300

Спиридонов М.И.

Нач. отдела 2700


Исаев В.А.

Составили настоящий акт о том, что результаты, полученные в диссертационной работе «Обеспечение эксплуатационных свойств деталей


и узлов ГТД локальным поверхностным легированием», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в технологический процесс производства газотурбинного двигателя АЛ-41.

Изменены финишные операции серийной технологии обработки зеркала гидроцилиндров: доводка и виброгалтовка стальными шариками в среде дисульфида молибдена заменена на комбинированное поверхностное упрочнение – локальное карбооксидирование и последующее алмазное выглаживание.

Использование указанных результатов позволило повысить ресурс работы изделия, уменьшить износ пары трения узла втулка-поршень.

Председатель:  Зубарев Г.И.

Члены комиссии:  Ельтищев Е.М.

 06.09.18 Исаев В.А.

 Спиридонов М.И.



АКТ

о внедрении результатов, кандидатской диссертационной работы
 Денисова Леонида Владимировича
 в учебный процесс федерального государственного бюджетного
 образовательного учреждения высшего образования «Московский
 авиационный институт (национальный исследовательский университет)»
 на кафедре «Технология производства и эксплуатации двигателей
 летательных аппаратов»

Настоящим актом подтверждается использование результатов, полученных в диссертационной работе «Обеспечение эксплуатационных свойств деталей и узлов ГТД локальным поверхностным легированием», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, при реализации учебных программ бакалавриата и магистратуры в курсах «Электрофизические и электрохимические процессы обработки», «Триботехника».

Результаты исследований, изложенные в диссертации, имеют научное и практическое значение. Выводы и рекомендации диссертационной работы применяются при реализации Основной образовательной программы высшего образования по направлению подготовки бакалавров и магистров по направлению «Двигатели летательных аппаратов», профиль «Технология производства двигателей летательных аппаратов».

Директор института №12,
 к.т.н., доц. каф. ИЛА
 Зав. кафедрой ТПЭДЛА,
 д.т.н., доц.
 д.т.н., проф. каф. ТПЭДЛА
 к.т.н., проф. каф. ТПЭДЛА
 старший преп. каф. ТПЭДЛА

 Иосифов П.А.
 Бойцов А.Г.
 Силуянова М.В.
 Курицына В.В.
 Денисов Л.В.

Управляющая программа О1

1) O1 G92 X0 Y0 Z0	14) Z#503
2) G65 H1 P#500 Q0	15) G65 H2 P#500 Q#500 R#503
3) G65 H1 P#100 Q0	16) X-#501 Z-#502
4) G65 H1 P#502 Q0	17) Z#503
5) G65 H4 P#502 Q#501 R250.0	18) G65 H2 P#500 Q#500 R#503
6) G65 H33 P#100 Q3.142 R#507	19) G65 H84 P1 Q#500 R#504
7) G65 H5 P#502 Q#502 R#100	20) M22
8) G65 H5 P#502 Q#502 R#509	21) M25
9) G1 G91	22) M24
10) M3	23) M5
11) M23	24) G90 G1 X#506
12) M21	25) M2
13) N1 F#505 X#501 Z#502	

Для удобства чтения каждая строка УП пронумерована.

Принятые обозначения при программировании регистров ЧПУ параметрами УП О1

- #100 — переменная для определения значения параметра $Lz_{(01)}$;
- #500 — текущее значение обработанного сектора, $\sum_0^i(T_i)$ (мм);
- #501 — значение параметра L (мм);
- #502 — значение параметра $Lz_{(01)}$ для координатной оси Z (мм);
- #503 — значение параметра t (мм);
- #504 — обрабатываемый сектор окружности (значение 250,0 соответствует обороту в 360° координатной оси Z), (мм);
- #505 — скорость рабочего хода ЛЭ, (мм/мин);
- #506 — расстояние для движения к реле автоотключения установки;
- #507 — значение параметра α (градус);
- #509 — значение параметра D (мм).

Управляющая программа О2

1)	O1 G92 X0 Y0	24)	M22
2)	G65 H1 P#510 Q0	25)	G4 X500 F#506
3)	N2 G65 H1 P#107 Q0	26)	G65 H85 P4 Q#105 R#509
4)	G65 H1 P#108 Q0	27)	N5 G65 H2 P#106 Q#106 R#507
5)	G65 H2 P#107 Q#107 R#501	28)	G65 H2 P#100 Q#100 R#504
6)	N3 G65 H32 P#103 Q#503 R#107	29)	G65 H32 P#103 Q#100 R#106
7)	G65 H31 P#104 Q#503 R#107	30)	G65 H31 P#104 Q#100 R#106
8)	G65 H1 P#106 Q#107	31)	G65 H3 P#101 Q#100 R#102
9)	G65 H1 P#105 Q0	32)	G3 X#103 Y#104 R#101
10)	G65 H1 P#100 Q#503	33)	G65 H2 P#105 Q#105 R1
11)	G65 H05 P#102 Q#504 R2	34)	G65 H84 P5 Q#105 R#509
12)	G90 G0 X#103 Y#104 F#505	35)	N4 M22
13)	M3	36)	M25
14)	M23	37)	M24
15)	M21	38)	M5
16)	N1 G65 H2 P#106 Q#106 R#507	39)	G65 H2 P#107 Q#107 R#500
17)	G65 H2 P#100 Q#100 R#504	40)	G65 H2 P#108 Q#108 R1
18)	G65 H32 P#103 Q#100 R#106	41)	G65 H84 P3 Q#108 R#512
19)	G65 H31 P#104 Q#100 R#106	42)	G65 H2 P#510 Q#510 R1
20)	G65 H3 P#101 Q#100 R#102	43)	G65 H84 P2 Q#510 R#511
21)	G3 X#103 Y#104 R#101	44)	M24
22)	G65 H2 P#105 Q#105 R1	45)	M05
23)	G65 H84 P1 Q#105 R#508	46)	M2

Для удобства чтения каждая строка УП пронумерована.

Принятые обозначения при программировании регистров ЧПУ параметрами УП О2

- #500 — значение параметра β (градус);
- #501 — значение параметра α (градус);
- #503 — значение параметра r (мм);
- #504 — значение параметра r' (мм);
- #505 — скорость рабочего хода ЛЭ, (мм/мин);
- #507 — значение параметра δ (градус);
- #509 — значение параметра k ;

- #512 — значение параметра N;
- #100, #101, #102 — переменные для определения конечной точки дуги;
- #103, #104 — переменные для определения координаты X и Y конечной точки дуги;
- #105 — значение параметра (счетчик) k_i ;
- #106 — значение параметра (счетчик) δ_i (градус);
- #107 — значение параметра (счетчик) β_i (градус);
- #108 — значение параметра N_i .

Управляющая программа ОЗ

- 1) O1 G92 X0 Y0 Z0
- 2) M3
- 3) M23
- 4) M21
- 5) G1 G91
- 6) G65 H1 P#500 Q0
- 7) N1 F#505 Z#501
- 8) X#502
- 9) G65 H2 P#500 Q#500 R#502
- 10) Z-#501
- 11) X#502
- 12) G65 H2 P#500 Q#500 R#502
- 13) G65 H84 P1 Q#500 R#504
- 14) M22
- 15) M25
- 16) M24
- 17) M5
- 18) M2

Для удобства чтения каждая строка УП пронумерована.

Принятые обозначения при программировании регистров ЧПУ параметрами УП ОЗ

- #501 — величина смещения ЛЭ вдоль координатной оси Z (мм).
- #502 — величина смещения ЛЭ вдоль координатной оси X (мм).
- #504 — величина обрабатываемого участка вдоль координатной оси X (мм).