

*На правах рукописи*



**Денисов Леонид Владимирович**

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

Специальность 05.07.05  
«Тепловые, электроракетные двигатели  
и энергоустановки летательных аппаратов»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва — 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Бойцов Алексей Георгиевич**

Официальные оппоненты: **Саушкин Борис Петрович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», профессор кафедры «Технологии и оборудование машиностроения»  
**Даутов Станислав Сагитович**, кандидат технических наук, автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий», инженер Центра проектирования производственных технологий и материалов

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»

Защита состоится «19» декабря 2018 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»: <https://mai.ru/upload/iblock/d6a/Denisov.pdf>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 212.125.08

доктор технических наук, профессор

Зуев Юрий Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Современное производство такой наукоемкой продукции как двигатели авиационной и ракетной техники невозможно без совершенствования технологий. Развитие прогрессивных методов обработки позволяет обеспечить работоспособность повысить 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 электроискрового (электроразрядного, электроэрозионного) легирования (упрочнения) (ЭИЛ), позволяют получать уникальные по свойствам комплексные покрытия и легированные слои (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. В производстве двигателя АЛ-31 технологии ЭИЛ использованы 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. Важнейшие теоретические выводы, закономерности и зависимости формирования электрического разряда в межэлектродном промежутке (МЭП) сформулированы в работах Б.Н. Золотых, А.Д. Верхотурова, В.И. Жура, Б.А. Среброва, З.И. Владковой, Ю.И. Мулина и А.Г. Бойцова.

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.

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); Институте проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины (А.В. Паустовский, М.С. Ковальченко), а также 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 легирующих электродов (ЛЭ) различного состава, дополнительных легирующих и защитных сред, позволяющих расширить область применения ЭИЛ и номенклатуру упрочняемых изделий. Исследования в области моделирования, расчета и управления составом и структурой ЛС. Необходимо устранение 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** является 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, обеспечивающих повышение надежности, ресурса и работоспособности деталей и узлов авиационной техники.

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 локального карбооксидирования (ЛКО) рабочих поверхностей гидроцилиндров (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 числовым программным управлением (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 задача создания эффективных технологий комбинированного упрочнения, позволяющих 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, 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 эродированных 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 упрочнения ЭИЛ, с предварительным созданием на поверхности растягивающих (сжимающих) напряжений;

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

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

**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 изделий, серийном производстве изделий. Внедренная технология позволила повысить ресурс работы ГЦ изделий, уменьшить износ пары деталей втулка-поршень по сравнению с базовой.

#### **Апробация результатов работы**

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 2007г.;

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

#### **Публикации по теме диссертации**

По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, из которых: 3 – статьи в рецензируемых изданиях, 2 – свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

**Личный вклад соискателя** заключается в проведенном анализе технологии ЭИЛ; разработанной модели формирования ЛС при ЭИЛ; спроектированной установки для ЛКО, 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 158 страниц машинописного текста, включает в себя 86 иллюстраций, 5 таблиц, 159 наименований источников литературы и 6 страниц приложений.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **ВВЕДЕНИИ** обоснована актуальность темы исследований. Представлена степень её разработанности. Обоснована научная новизна, отмечена 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, 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.

При упрочнении поверхностей методом ЭИЛ приходится неизбежно сталкиваться с многофакторными составляющими условий протекания электроискровых процессов, при которых сложно получить сплошные, равномерные, необходимой толщины и шероховатости ЛС. 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 анализа 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 оценки служебных свойств упрочненных поверхностей.

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 также на серийных комплектах изделий:

- ГЦ системы управления критическим сечением реактивного сопла;
- ГЦ системы управления поворотным устройством реактивного сопла;
- ГЦ поворотного входного направляющего аппарата компрессора низкого давления;
- ГЦ поворотного направляющего аппарата компрессора высокого давления.

Шток и тело ГЦ обычно изготавливают из титановых сплавов (сплав ВТ20), обладающих низкими антифрикционными свойствами. 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 обеспечивает необходимого ресурса ГЦ.

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

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

Экспресс-оценка антифрикционных свойств упрочненных поверхностей выполнялась в условиях плоского кольцевого контакта на маятниковом трибометре.

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.

Для построения модели были сделаны следующие допущения:

1. Количество выделяющейся энергии в канале разряда прямо пропорционально объемам эродируемого в процессе материала как сопряженных электродов, так дополнительно вводимому в МЭП в виде порошка 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.

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:

$$V_{a,k,p} = xV_{a,k,p} + yV_{a,k} + zV_{a,k,p} \quad (1)$$

Следуя выражению (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 потерянного 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, индекс 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 эродируемых материалов с электродов согласно формуле (1);

– определяются промежуточные объемы материалов элементов, формирующие ЛС по формуле (1);

– определяются окончательные объемы материалов элементов, не подвергающиеся воздействию последующего разряда импульса, следовательно, сформировавшие ЛС.

На первой стадии рассчитываются суммарные величины энергий исходя из выражения (1).

$$E_a = xQ_k + yQ_a + xQ_p \quad (2)$$

– 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);

$$E_k = xQ_a + yQ_k + xQ_p \quad (3)$$

– соответственно для катода.

На второй стадии объем и концентрационное соотношение осажденных материалов элементов  $(a,k,p)$  на аноде (индекс « $i$ » принимает значение  $a$ ) и катоде (индекс « $i$ » принимает значение  $k$ ) подвергаются эрозии при втором, и далее  $n^{\text{-ном}}$  импульсах. Материалы формируются с учетом количества выделяющейся энергии при разряде, величины и концентрационного соотношения ранее образовавшегося ЛС.

$$V_{i(a,k,p)n} = \frac{Q_i}{Z_{(a,k,p)}} \left( \frac{V_{i(a,k,p)(n-1)} Z_{(a,k,p)}}{V_{a(n-1)} Z_a + V_{k(n-1)} Z_k + V_{p(n-1)} Z_p} \right) \quad (4)$$

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

$$V_{i(a,k,p)n} = \frac{E_{a(n-1)}}{Z_{(a,k,p)}} \left( \frac{V_{i(a,k,p)(n-1)} Z_{(a,k,p)}}{V_{a(n-1)} Z_a + V_{k(n-1)} Z_k + V_{p(n-1)} Z_p} \right) + \Delta V_{in} \quad (5)$$

– если эродировать весь материал, осажденный на предыдущем импульсе, и часть исходного материала электрода  $\Delta V_{in}$ , 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 (2) и (3), определяются новые объемы элементов в последующем формирующемся слое.

Определение суммарных величин энергий при отсутствии значений  $\Delta V_{in}$  на второй стадии на основе результатов из формул (4) и (5):

$$E''_a = E'_a - \sum_i^{a,k,p} (xV_{a(i)} Z_{(i)} - zV_{a(i)} Z_{(i)} + xV_{k(i)} Z_{(i)}) + V_p \quad (6)$$

$$E''_k = E'_k - \sum_i^{a,k,p} (xV_{k(i)} Z_{(i)} - zV_{k(i)} Z_{(i)} + xV_{a(i)} Z_{(i)}) + V_p \quad (7)$$

Если рассчитывались значения  $\Delta V_{in}$  на второй стадии:

$$E''_a = \sum_i^{a,k,p} (yV_{a(i)} Z_{(i)} + xV_{k(i)} Z_{(i)}) + V_p \quad (8)$$

$$E''_k = \sum_i^{a,k,p} (yV_{k(i)} Z_{(i)} + xV_{a(i)} Z_{(i)}) + V_p \quad (9)$$

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:

$$V'_{a(a,k)} = yV_{a(a,k)} + xV_{k(a,k)} \quad (10)$$

$$V'_{a(p)} = yV_{a(p)} + xV_{k(p)} + V_p \quad (11)$$

$$V'_{k(a,k)} = yV_{k(a,k)} + xV_{a(a,k)} \quad (12)$$

$$V'_{k(p)} = yV_{k(p)} + xV_{a(p)} + V_p \quad (13)$$

Аналогично определяются величины энергий для формирующихся ЛС на последующих импульсах.

Считаем, что перемещение электрода вдоль поверхности не оказывает

напрямую влияя на концентрационное соотношение элементов в ЛС электрода, а соотношение элементов в смежной с электродом и подвергающейся легированию поверхности в конкретный импульс меняется согласно формуле (6):

$$V_{a(a)m} = V_{a(a)} + (1 - M)V_{a(k)} + (1 - M)V_{a(p)} \quad (14)$$

$$V_{a(k,p)m} = MV_{a(k,p)} \quad (15)$$

где:  $M$  – коэффициент, учитывает скорость перемещения электрода ( $M = 0$  означает, что электрод полностью сместится относительно предыдущего места разряда, 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. После чего строятся графики распределения элементов в ЛС для долевых коэффициентов «x», «y», «z». Первые три значения для анода, последующие три для катода ( $x_a; y_a; z_a; x_k; y_k; z_k$ ). Упростим запись: ( $x_a/y_a; x_k/y_k$ )

$V_{i(a,k,p)(1f)}$  – 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.

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

На рисунке 1 представлен алгоритм расчета основных показателей модели.

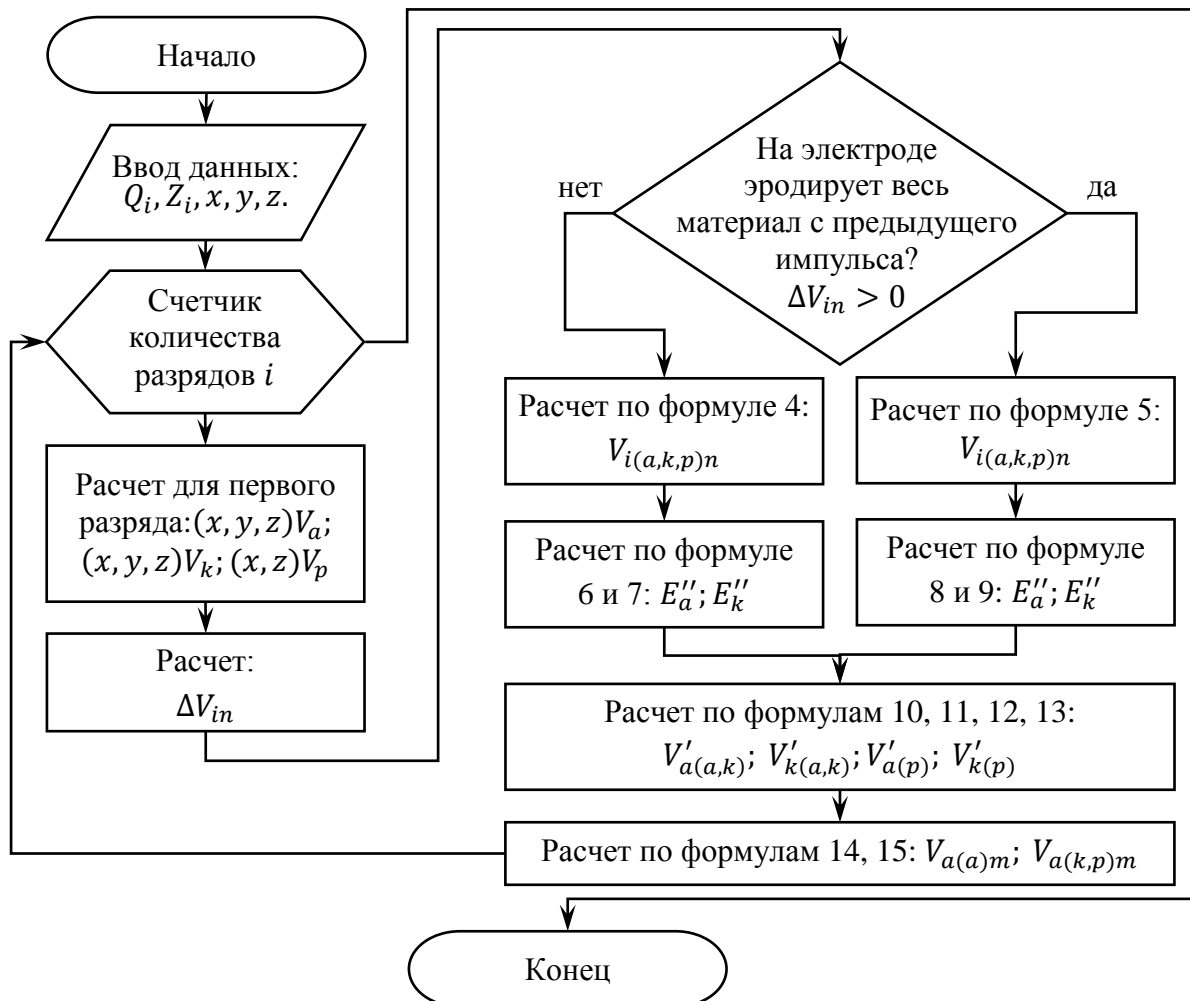


Рисунок 1 – Алгоритм модели переноса материалов и формирования ЛС

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. 2).

Данный факт выявлен при значениях долевых коэффициентов 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.

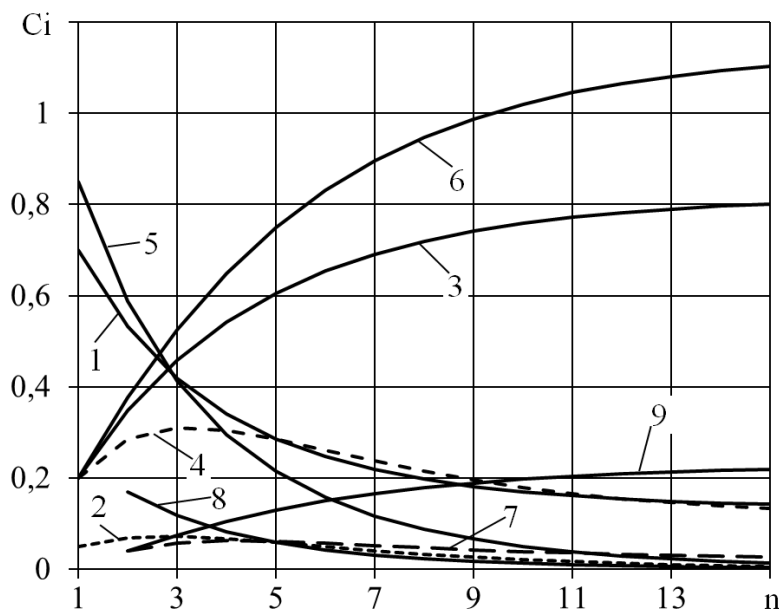


Рисунок 2 – Зависимость распределения долей элементов  $C_i$  участвующих при разряде в процессе ЭИЛ от импульса  $n$

На рисунке 2 представлена зависимость распределения долей элементов  $C_i$  участвующих при разряде в процессе ЭИЛ от номера импульса  $n$  для коэффициентов  $(0,2/0,7; 0,05/0,85)$ , величины энергии  $Q_a = Q_k = 1/2 Q_p$ . Доли осаждения порошка: на анод 0,1 и катод 0,1. Кривые 1, 2, 3 –  $V_{a(a)}$ ,  $V_{a(k)}$  и  $V_{a(p)}$  промежуточные объемы материалов элементов, формирующие ЛС на аноде; 4, 5, 6 –  $V_{k(p)}$ ,  $V_{k(k)}$  и  $V_{k(a)}$  промежуточные объемы материалов элементов, формирующие ЛС на катоде; 7, 8, 9 –  $V_{k(a)}$ ,  $V_{k(k)}$  и  $V_{k(p)}$  окончательные объемы материалов элементов сформировавшие ЛС.

Показанные зависимости отражают изменение концентрации элементов ЛС 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.

Для перехода от значений объемов к толщинам слоев можно использовалось соотношения (6) и (7):

$$h_i = Z_{mi} Z_i V_i \quad (16)$$

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

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

Далее приведены результаты расчета для трехкомпонентной модели в зависимости от скорости электрической эрозии обрабатываемых материалов и количества выделяющейся энергии во время электрического разряда  $E_p$ .

$$E_p = I_k U_o t_{и} \quad (17)$$

Здесь  $I_k$  – величина тока короткого замыкания, А;

$U_o$  – напряжение между электродами, В;

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

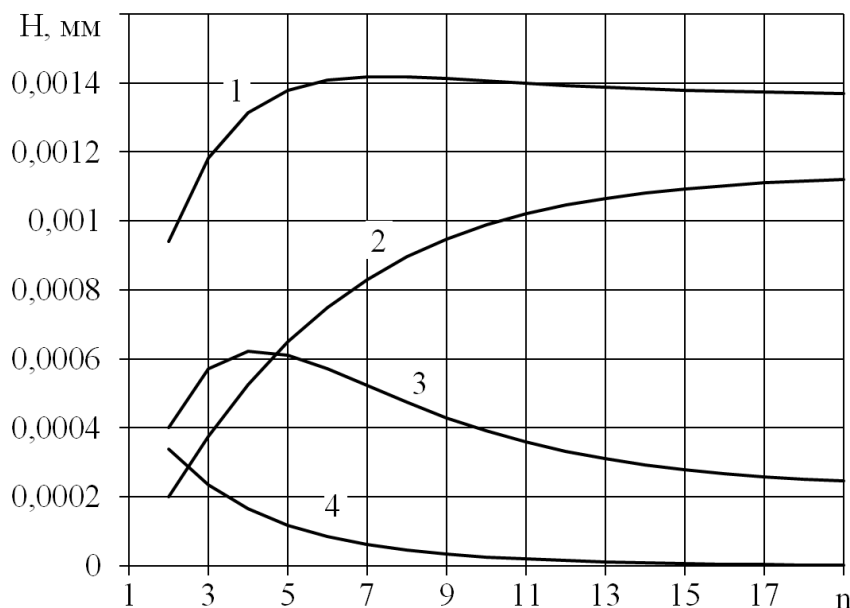


Рисунок 3 – Толщины слоев, получаемые при легировании стали ЭИ961 электродом из Ti и, дополнительно, введением в МЭП материала из Ta

На рисунке 3, кривая 1 – толщина слоя после каждого разряда; кривая 2, 3, 4 – соответственно соотношение легирующих материалов в подложке Ta, Ti, сталь.

Из приведенных зависимостей (рис. 3) следует, что формирование слоя происходит в очень коротких интервалах для идеальных условий, с учетом оговоренных выше допущений. Концентрационное соотношение элементов в дальнейшем стабилизируется, что говорит о необходимости подбора оптимального удельного времени легирования единицы поверхности.

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 (рис. 4, а).

Зона наибольших сжимающих напряжений находится на глубине 10-15 мкм. Изменение зоны с отрицательными напряжениями по глубине образца представлено на графике (рис. 4, б).

Смоделирована, последовательно, серия групповых искровых разрядов на поверхности образца с предварительно наведенными растягивающими и сжимающими напряжениями на легируемой поверхности.

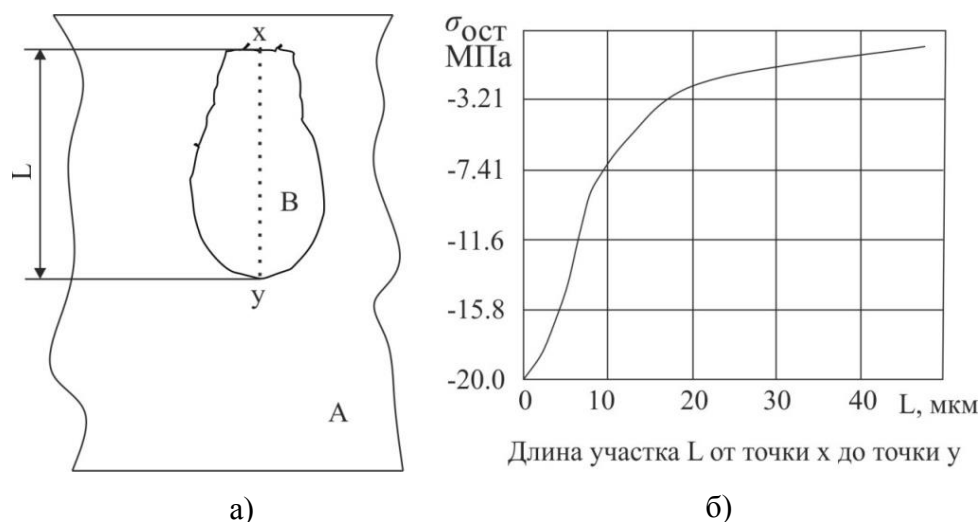


Рисунок 4 – Область с положительными «А» и отрицательными «В» остаточными напряжениями от единичного разряда (а); график распределения отрицательных напряжений на участке L от точки x до точки y (б)

Сделан вывод, что образцы с предварительно созданными растягивающими напряжениями (рис. 5, б) после легирования и разневоливания имеют минимальные растягивающие напряжения на поверхности. Остаточные напряжения сжатия наиболее равномерно распределены по всей глубине пластины.

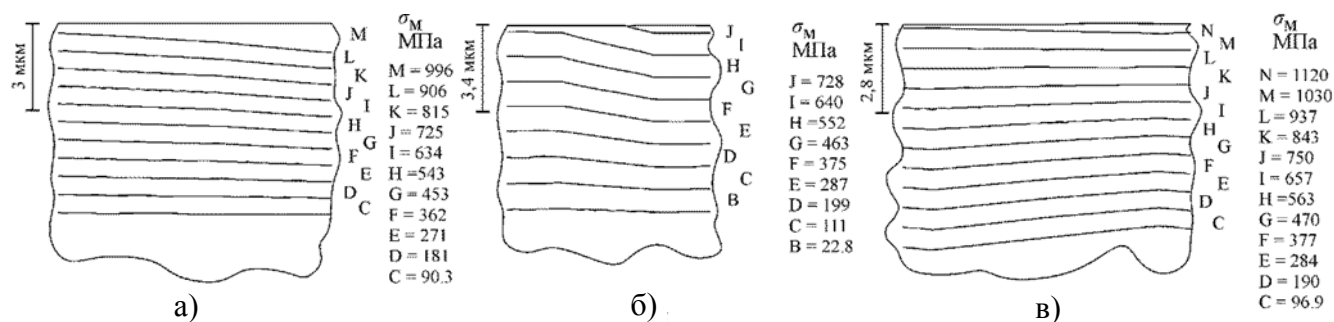


Рисунок 5 – Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое после легирования. ЭИЛ на образце без предварительного нагружения (а), поверхностный слой растянут перед ЭИЛ (б), поверхностный слой сжат перед ЭИЛ (в)

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.

Площадь пятна контакта  $S$  дискового ЛЭ толщиной  $t$  и радиусом  $R_2$  с поверхностью зеркала цилиндра радиусом  $R_1$  находится как  $S = Lt$ , где  $L$

находится через уравнение (18).  $R_3$  переменная, отвечающая за значения величины МЭП.

$$L = 2R_1 \arccos \left( \frac{R_1(R_1 - R_2) - R_3(R_1 + R_2)}{(R_1 - R_2)(R_1 - R_3)} \right) \quad (18)$$

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).

За одну операцию обработки поверхности цилиндра без смены ЛЭ, угол наклона спирали  $\gamma$  должен обеспечить необходимое перекрытие  $M$ .

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

$$P = M + \Delta M$$

Где  $\Delta M$  – дополнительная зона перекрытия траектории движения ЛЭ.

Таким образом, исключается необходимость корректировать управляющую программу в процессе операции нанесения покрытия на поверхность зеркала цилиндра. При этом разницы в сплошности и равномерности покрытия на первых и последних минутах обработки не отмечено.

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 (рис. 6).

На величину остаточных напряжений, возникающих при ЭИЛ, влияет материал ЛЭ.

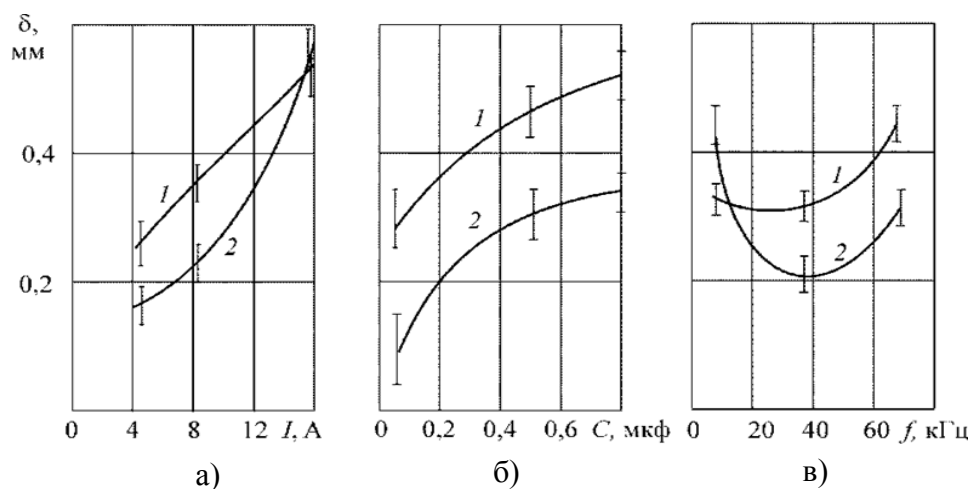


Рисунок 6 – Влияние режимов ЭИЛ на величину прогиба образцов:  
 а)  $f = 66$  кГц,  $C = 0,47$  мкФ; б)  $f = 66$  кГц,  $I = 11,2$  А; в)  $I = 11,2$  А,  $C = 0,47$  мкФ;  
 1 – ЛЭ из ВК6М; 2 – ЛЭ из Al

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 ГЦ 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 (рис. 7).

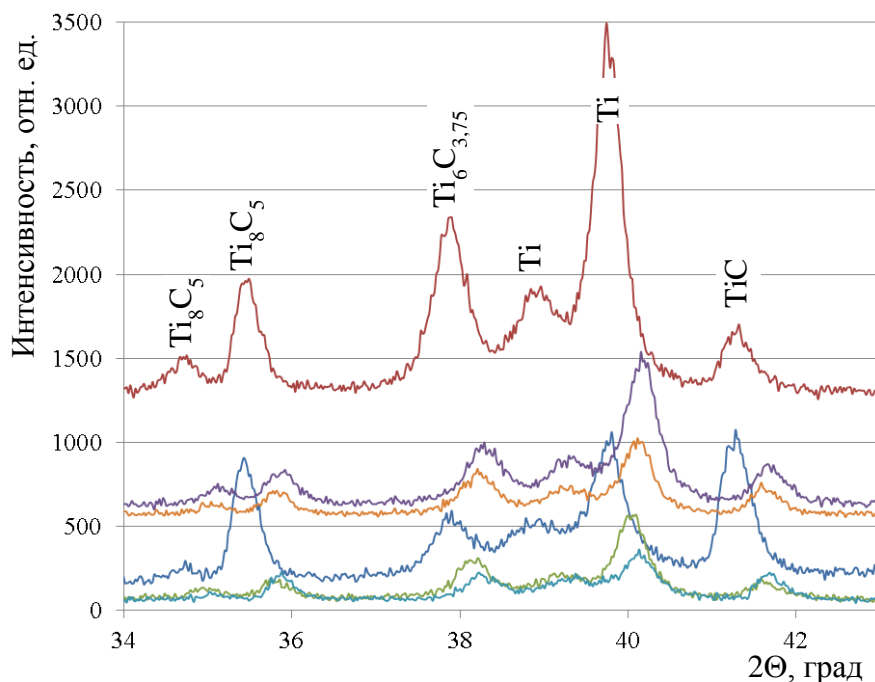


Рисунок 7 – Рентгенограмма покрытий с применением банка данных PDF-2

По результатам качественного анализа обнаруживаются структура упорядоченной фазы  $Ti_8C_5$ , принадлежащей к тригональной синггонии (пр. гр.  $R\bar{3}m$ );  $TiC$ , а также структура  $Ti_6C_{3,75}$ .

В исследуемых покрытиях локально обнаружены участки с высокой степенью кластеризации графитовых слоев G – спектральная линия  $sp^2$  углерод (рис. 8, 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  $I_D/I_G = 1,57$ ) рисунок 8, а.

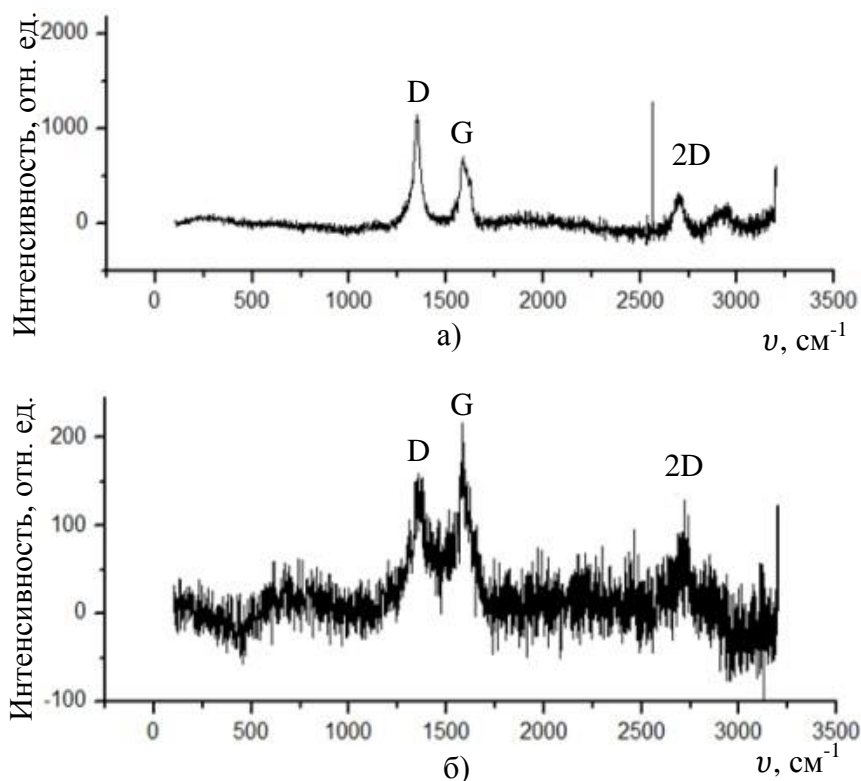


Рисунок 8 – Спектры частот  $\nu$  комбинационного рассеивания для образцов.

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

Испытания, выполненные на технологическом изделии, показали, что износ зеркала за время наработки минимален, а его величина в 2...3 раза ниже, чем у ГЦ, обработанных по базовой технологии.

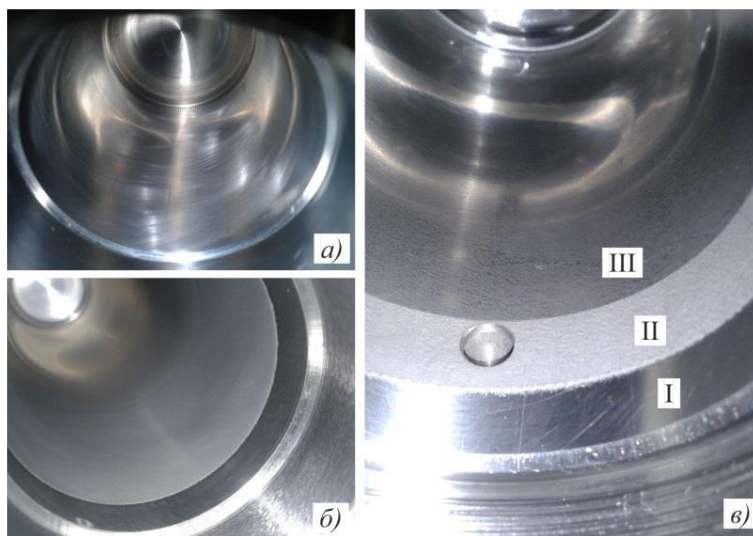


Рисунок 9 – Поверхность ГЦ: а) исходная, б) после ЛКО.

в) поверхность ГЦ (I) после ЛКО (II) и алмазного выглаживания (III)

По технологии ЛКО происходит сканирование инструментом обрабатываемой поверхности (I), что позволяет сформировать покрытие по

контуру препятствия (II), без необходимости усложнения управляющей программы ЧПУ (для огибания отверстия) или создания сложной оснастки (для экранирования внутренних поверхностей отверстия) (рис. 9, в).

Для проведения поэтапных мероприятий ЛКО и алмазного выглаживания, направленных на повышение ресурса ГЦ, были спроектированы и изготовлены соответствующее оборудование и приспособление (рис. 10).

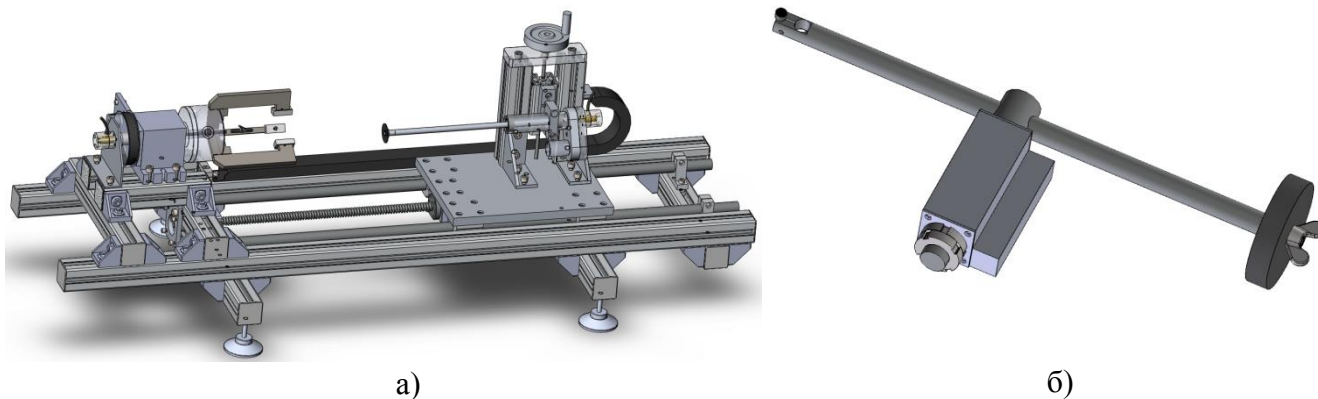


Рисунок 10 – Трехмерная модель установки для ЛКО (а), устройство для алмазного выглаживания (б)

Установка оснащена генератором технологического тока. Вывешенный самоустанавливающийся шпиндель (рис. 11, а) позволяет отказаться от использования сложной системы поддержания межэлектродного зазора, при этом обеспечивает оптимальные характеристики МЭП для формирования ЛКО покрытия.

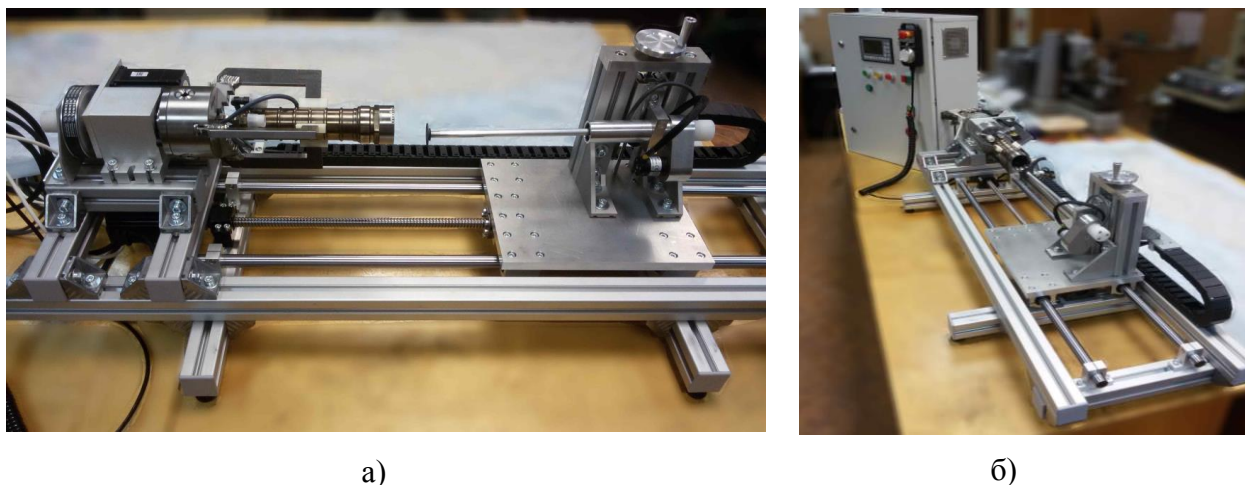


Рисунок 11 – Установка для ЛКО

Даны рекомендации по применению электроискрового легирования и комбинированного упрочнения.

Карбоксицирование и последующее выглаживание позволяют в несколько раз повысить сопротивление износу рабочих поверхностей. Покрытие обладает необходимой несущей способностью. Препятствует образованию задиров, а также схватыванию контртела с титановой поверхностью. Отсутствует необходимость в предварительной подготовке поверхности под ЛКО. Отсутствует необходимость в изоляции обрабатываемой зоны на детали. Алмазное выглаживание сглаживает

исходный профиль микронеровностей легированной поверхности и позволяет получить значения шероховатости  $Ra = 0,1$  мкм или несколько большей, в зависимости от исходной, а также твердостей подложки и ЛС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам 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. Выявить основные пути развития технологии ЭИЛ в направлениях повышения качества упрочнения, определить 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. Предложена методика 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 в два-три раза 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 «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов».

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в рецензируемых научных изданиях**

1. Денисов Л.В., Пискарев А.С., Бойцов А.Г. Локальное карбооксидирование титановых сплавов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. Вып. 8. С. 24-29.

2. 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.

3. 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.

### **Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ**

1. Программа генерирования управляющего кода для FANUC 3M ЧПУ систем на основе двумерного чертежа формата DXF. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614432 / Денисов Л.В., Грачев М.В., Пискарев А.С.; правообладатель Денисов Л.В.; заявка № 2010612656; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 7 июля 2010г.

2. Модель переноса материалов и формирования легированного слоя при электроэрозионном упрочнении. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011618718 / Денисов Л.В.; правообладатель Денисов Л.В.; заявка № 2011616890; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 ноября 2011г.

### **Другие статьи и материалы конференций**

1. Денисов Л.В., Прытков А.В. Исследование влияния электроэрозионного упрочнения на антифрикционные свойства поверхностей // Новые материалы и технологии – НМТ–2006: сб. труд. Всероссийской научно-технической конференции в 3 томах (Москва, 21-23 ноября 2006г). 2006. Т. 2. С. 37-38.

2. Денисов Л.В., Бойцов А.Г. Исследование возможностей электроразрядной обработки по восстановлению деталей ГТД // Научные труды МАТИ. 2006. Вып. 10 (82). С. 123-128.

3. Денисов Л.В. Моделирование процесса формирования легированного слоя при электроразрядной обработке // XXXIII Гагаринские чтения: сб. научных трудов Международной молодежной научной конференции в 8 томах. 2007. Т. 2. С. 59-60.

4. Денисов Л.В., Бойцов А.Г. Исследование влияния факторов электроразрядной обработки по формированию напыляемого слоя на детали ГТД // Научные труды МАТИ. 2007. Вып. 13 (85). С. 117-121.

5. Денисов Л.В. Влияние межэлектродной среды на процесс формирования легированного слоя при электроразрядном упрочнении // XXXIV Гагаринские чтения: сб. научных трудов Международной молодежной научной конференции в 8 томах (Москва, 1–5 апреля 2008г). 2008. Т. 2. С. 47-48.

6. Денисов Л.В., Бойцов А.Г. Влияние технологических режимов электроразрядной обработки на формирование легированного слоя // Научные труды МАТИ. 2008. Вып. 14 (86). С. 181-186.

7. Денисов Л.В. Электроразрядные процессы упрочнения, используемые для нанесения покрытий и восстановления поверхностей деталей ГТД // XXXV Гагаринские чтения: сб. научных трудов Международной молодежной научной конференции в 8 томах (Москва, 7–10 апреля 2009г). 2009. Т. 2. С. 46-47.

8. Денисов Л.В., Бойцов А.Г. Области применения защитных комбинированных покрытий при эксплуатации высоконагруженных деталей летательной техники // Научные труды МАТИ. 2009. Вып. 16 (88). С. 117-122.

9. Денисов Л.В., Грачев М.В., Бойцов А.Г. Фазовый и элементный состав поверхностного слоя после электроискрового легирования // Труды ГОСНИТИ. 2010. Т. 106. С. 47-49.

10. Денисов Л.В. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез в условиях электроискрового упрочнения // XXXVI Гагаринские чтения: сб. научных трудов Международной молодежной научной конференции в 8 томах (Москва, 6–10 апреля 2010г). 2010. Т. 2. С. 45-46.

11. Денисов Л.В., Бойцов А.Г. Многослойное и многокомпонентное легирование для повышения качественных характеристик защитных покрытий // Новые материалы и технологии – НМТ-2010: сб. труд. Всероссийской научно-технической конференции в 3 томах (Москва, 16-18 ноября 2010г). 2010. Т. 2. С. 37-38.

12. Денисов Л.В., Бойцов А.Г. Особенности формирования защитных покрытий на титановых сплавах методом электроискрового легирования // Новые материалы и технологии – НМТ-2012: сб. труд. Всероссийской научно-технической конференции (Москва, 20-22 ноября 2012г). 2012. С. 138-139.

13. 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.

14. Денисов Л.В. Упрочнение титановых сплавов электроискровым легированием графитовыми электродами // XXXIX Гагаринские чтения: сб. научных трудов Международной молодежной научной конференции в 9 томах (Москва, 9–13 апреля 2013г) 2013. Т. 2. С. 37-38.

15. 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.





