

На правах рукописи

Чекалова

ЧЕКАЛОВА Елена Анатольевна

**НАУЧНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ФОРМИРОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУ-
МЕНТА И ДЕТАЛЕЙ ДИСКРЕТНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ ОКСИД-
НЫХ СЛОЕВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ДОЛГОВЕЧНОСТИ**

Специальность

2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре «Технологии и оборудования машиностроения» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет» (Московский политех) и в НИО-9 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный консультант: – доктор технических наук, профессор
Овчинников Виктор Васильевич

Официальные оппоненты: **Филиппов Михаил Александрович**,
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор

Еремеева Жанна Владимировна,
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», профессор

Кусманов Сергей Александрович,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Костромской государственной университет», директор института

Ведущая организация: ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук

Защита диссертации состоится 27 января 2022 г в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 24.2.327.04 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 121552 г. Москва, ул. Оршанская, д. 3, ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvorcovasv@mat.i.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте https://mai.ru/upload/iblock/2a8/elf4140maw14it4hyi3xzx84ofhkih21/Dissertatsiya_CN_ekalova.pdf

Автореферат разослан «_____» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Скворцова С.В.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. В планах развития науки, техники и технологий в сфере деятельности Государственной корпорации «Ростех» на период до 2030 года предполагается создание новых методов и технологий по увеличению ресурса изделий и долговечности инструмента, предназначенного для изготовления и обработки специальных материалов. Научные исследовательские работы, выполняемые по государственным программам перспективных авиационных комплексов, входят в перечень первоочередных задач современного авиационного материаловедения и технологии. От их решения в существенной мере зависит как прогресс в двигателестроении и смежных областях промышленности в целом, так и получение ряда инновационных теоретико-прикладных разработок в области материаловедения. Значимость таких работ отражается в ежегодных посланиях Президента РФ, а также в ряде государственных программ и специальных документов соответствующих ведомств. Задачи, решаемые в данной работе, охватывают несколько разделов: «Приоритетные направления развития науки, технологий и техники РФ»; «Критические технологии РФ» (приказ Президента РФ ПР-842, Пр-843 от 21.05.2006г.), а также в полной мере соответствуют научным и научно-прикладным задачам, сформулированным перед Акционерным Обществом «Объединенной двигателестроительной корпорации» (АО «ОДК»).

Стратегия повышения надежности и долговечности машин требует коренного улучшения качества деталей и узлов производимой продукции. Успешное решение этой проблемы практически невозможно без разработки и внедрения новых, более совершенных материалов и эффективных технологических процессов. Особое место в достижении необходимого качества деталей машин принадлежит поверхностному упрочнению инструментальных и конструкционных материалов.

Классически упрочнение инструментальных и конструкционных материалов достигается введением легирующих элементов и термической обработкой путем рационального управления химическим составом и структурой материалов.

Применение упрочняющих технологий и покрытий на деталях и инструментах, используемых при их обработке, позволяет существенно повысить надежность и долговечность как самих машин, так и срок службы инструментов и оборудования, в про-

цессе серийного производства – такой подход успешно использован в работах известных российских и зарубежных ученых Е.Н. Каблова, О.А. Банных, В.И. Третьякова, А.С. Верещака, Г.С. Креймера, А.М. Дальского, Е. Anschuz и других.

В то же время для целого ряда наиболее массовых и ответственных деталей, таких как лопатки компрессора газотурбинных двигателей, работающих в условиях воздействия высоких знакопеременных нагрузок, коррозионно-эрозионного воздействия газовой среды, которые как правило оказывают определяющее значение на ресурс двигателей в целом, весьма актуальной является проблема разработки новых более эффективных методов поверхностного упрочнения.

Повреждаемость деталей выражается обычно в образовании усталостных трещин, забоин, питтингов, коррозионно-эрозионных повреждений. Циклические термомеханические нагрузки являются одной из основных причин преждевременного разрушения режущих кромок инструментальных материалов. Особенно остро проблема упрочнения инструментальных и конструкционных материалов приобрела при разработке новых высоконагруженных энергоёмких машин, при решении проблем снижения трудоёмкости и себестоимости, существенного повышения их конкурентоспособности на мировом рынке.

Создание перспективных газотурбинных двигателей неизбежно сопровождается резким ужесточением условий их эксплуатации, повышением уровня термомеханических циклических нагрузок, необходимостью применения более совершенных инструментальных материалов, повышения качества обработки поверхностей. В связи с этим весьма актуальным направлением решения проблемы повышения надежности и долговечности инструментов и изделий является создание новых высокоэффективных износостойких покрытий.

Основной причиной преждевременной потери работоспособности лопаток компрессора и инструментов является разрушение упрочняющих покрытий. Важнейшее значение в решении проблемы долговечности приобретает установление механизмов изнашивания и разрушения покрытий на инструментальных и конструкционных материалах.

Другой важной задачей является разработка новых, более надежных и экономичных промышленных технологий формирования упрочняющих покрытий, обеспечивающих высокую стабильность качества и воспроизводимость физико-механических

свойств. Высокую актуальность приобретает установление функциональных связей между параметрами технологического процесса формирования покрытий и их эксплуатационными характеристиками.

Комплексный подход к решению поставленных задач предполагает, прежде всего, глубокое изучение механизмов разрушения покрытий в условиях воздействия нестационарных термомеханических нагрузок, научное обоснование целенаправленного легирования поверхностного слоя деталей и инструмента для получения заданных эксплуатационных свойств.

В работе предлагается принципиально новое решение проблемы долговечности деталей машин и инструмента, состоящее в разработке нового типа диффузионных покрытий с дискретной ячеистой структурой нестехиометрического состава, обладающих повышенной износостойкостью.

Актуальность исследований подтверждена Государственной научно-технической программой Российской академии наук с 2010 года до 2015г., в частности такими ее проектами, как «Исследование физико-химических закономерностей взаимодействия электронных, ионных и плазменных потоков с поверхностью конструкционных и инструментальных материалов, моделирование и разработка проектов электронно-ионно-плазменных технологий»; «Многофункциональные ионно-плазменные покрытия для изделий межотраслевого назначения»; «Композиционные конденсированные ионно-плазменные покрытия для изделий машиностроения» и др.

Работа выполнена в рамках проектов:

– государственный контракт № Р/415611221075 (КНР) от 30.12.2015 и по доп. исполнению 015611221560-11DMAC\SFB577RF.

– договор № 356и-116 от 14.05.2013г. с ОАО «НПК Иркут» НИОКТР тема № 8600/2 «Работы по повышению надёжности и ресурса, отработке прогрессивных ремонтных технологий и уменьшению трудоёмкости изготовления лопаток компрессора».

– договор №РЗ-07/02/04Р/0404-18 от 10.09.2018г.с АО «МПО им. И. Румянцева» НИОКР тема «Разработка и исследование технологии повышения износостойкости режущего инструмента путем применения дискретного диффузионного покрытия» по направлению «Упрочнение инструментального материала»

– государственного задания №FSFF-2020-0017 «Теоретические и экспериментальные исследования в области получения и обработки перспективных металлических и композиционных материалов на основе алюминиевых и титановых сплавов».

Цель работы – повысить технологические и эксплуатационные свойства инструментов и деталей за счет создания поверхностного диффузионного дискретного оксидного слоя при обработке током коронного разряда.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие основные задачи:

- разработать теоретическую модель оценки долговечности образца с диффузионным дискретным оксидным слоем для по сравнению со сплошным покрытием;
- изучить влияние дискретного оксидного слоя на физико-механические свойства поверхности материала;
- разработать новый метод получения током коронного разряда при низких температурах (вплоть до комнатной), на поверхности режущего инструмента и деталей из конструкционных материалов диффузионных дискретных оксидных слоев
- установить рекомендуемые параметры технологического процесса, увеличивающие долговечность режущего инструмента и деталей в условиях эксплуатации;
- установить влияние химического состава газовой среды и параметров технологического процесса на структуру формируемого оксидного слоя;
- исследовать влияние структурных особенностей дискретных оксидных слоев на физико-механические и режущие свойства инструментального материала;
- выявить механизм торможения изнашивания режущего инструмента с дискретным оксидным слоем при точении и фрезеровании;
- разработать методику и критерий оценки долговечности материалов с диффузионным дискретным оксидным слоем по величине молярной энергии активации $U_{эф}$;

- разработать способ повышения долговечности лопаток компрессора двигателя на второй ресурс путем восстановления износостойкого покрытия на антивибрационных бандажных полках;
- разработать оборудование и технологию получения диффузионных дискретных оксидных слоев на инструментальных и конструкционных материалах.

Научная новизна:

1. Установлено, что при обработке током коронного разряда в диапазоне $I_K = 140 - 440$ мкА при температуре $20-25^\circ\text{C}$ на поверхности инструментальных и конструкционных материалов Р6М6, Р6М5К5, ВК10ХОМ, ВТЗ-1 происходит образование дискретных оксидных слоев состава $(\text{Fe}_x\text{O}(x \sim 0,84-0,96), \text{Fe}_2\text{O}_3; \text{Fe}_3\text{O}_4; \text{WO}_2(\delta); \text{Co}_3\text{O}_4(\text{II}, \text{III}), \text{CoO}(\text{II}); \text{WO}_{2,90}; \text{WO}_{2,72}; \text{TiO}, \text{Ti}_2\text{O})$.

2. Разработана физико-химическая модель формирования диффузионного дискретного оксидного слоя в зоне контакта металла с потоком образующейся холодной воздушной плазмы. На основе разработанной модели рассчитаны пороговый коэффициент активации коронного разряда начала протекания процесса ионизации и электрические параметры стационарного процесса формирования оксидного слоя. Показано, что плотность заряда и положительных ионов, осаждаемых на поверхности металла, должны соответствовать $\rho_i^+ \sim K_i^+ \cdot \rho_C = (1,23 - 12,3) \cdot 10^{-3} \text{ мг/м}^3$ и $n_i^+ \sim K_i^+ \cdot n_C = (2,547 - 25,47) \cdot 10^{16} \text{ 1/м}^3$, соответственно.

3. Разработана физическая модель, описывающая влияние дискретного и сплошного диффузионного оксидного слоя на долговечность и физико-механические свойства поверхностного слоя металлических материалов. На основании сопоставления упругой деформации, модуля упругости и коэффициента Пуассона показано, что при фиксированной относительной деформации образца наличие диффузионного дискретного оксидного слоя приводит к снижению растягивающих напряжений в прилегающем к этому слою металле, изменению термофлуктуационного механизма разрушения нагруженных межатомных связей, приводящих к увеличению долговечности металла.

4. В качестве характеристики энергоемкости инструментального материала по отношению к износу предложена эффективная молярная энергия активации $U_{\text{ЭФ}}$. Установлена взаимосвязь между периодом стойкости режущего инструмента $T_{\text{СТ}}$,

средней температурой его режущей кромки T и соответствующей им эффективной величиной молярной энергоемкости $U_{ЭФ}$ процесса износа.

5. Установлено влияние химического состава газовой среды и параметров коронного разряда на структуру оксидного слоя на поверхности подложки из обрабатываемого материала. Показано, что поликристаллическая структура со средним размером зерна около 4 мкм, содержащая промежуточные оксидные фазы ($Fe_xO(x \sim 0,84-0,96)$, $Fe_2O_3; Fe_3O_4; WO_2(\delta)$; $Co_3O_4(II,III)$, $CoO(II); WO_{2,90}; WO_{2,72}; TiO, Ti_2O$) нестехиометрического состава, формируется в дискретном слое толщиной 0,90-0,95 мкм, при этом тип оксидных фаз определяется разным процентным содержанием кислорода в потоке холодной плазмы.

6. Показано, что в процессе обработки резанием в результате нагрева инструмента из сплавов на основе железа происходит насыщение дискретного слоя оксидов кислородом и их переход в стабильную стехиометрическую фазу типа Fe_3O_4 . Этот процесс начинается с образования гематита, затем, по мере возрастания температуры нагрева инструмента и снижения концентрации кислорода под слоем гематита образуется слой магнетита и ниже слой вюстита. Таким образом, чем выше температура, тем больше в окалине вюстита и меньше гематита. Указанная эволюция фазового состава дискретного оксидного слоя повышает эффективную величину молярной энергоемкости $U_{ЭФ}$ и, соответственно, повышает износостойкость режущих кромок.

7. Построена математическая модель для решения задачи по оптимизации параметров процесса нанесения локального диффузионного дискретного оксидного слоя. Модель основана на использовании мультипликативной экспоненциально-степенной функции, выражающей зависимость величины изнашивания задней поверхности режущей кромки пластины от тока коронного разряда, давления сжатого воздуха, угла наклона сопла к образцу и расстояния от сопла до образца.

8. Показано, что при поперечном точении стали 40Х резцом с твердосплавной пластиной IC50M применение дискретного оксидирования пластины вместо сплошного способствует снижению фаски износа на 23% (с 0,09 мм до 0,07 мм), а дискретное оксидирование твердосплавных фрез BK10XOM – снижению износа задней поверхности зуба на 40% (с 0,20 до 0,12 мм) при черновом фрезеровании титановых лопаток из сплава BT6.

Практическая значимость работы:

1. Разработана технология обработки режущего инструмента на воздухе током коронного разряда при температуре 20–25 °С для создания на поверхности диффузионных дискретных оксидных слоев системы Me–MeO–MeO–O₂. Формирование таких слоев увеличивает долговечность инструмента из быстрорежущих материалов в 1,5–3 раза, из твердосплавных материалов в 1,8–2,5 раза и циклическую долговечность на 30–50% по сравнению со сплошным стехиометрическим покрытием.

2. Разработана установка для формирования дискретного оксидного слоя на режущем инструменте и деталях различной номенклатуры и типоразмеров, отличающаяся высокой производительностью, малым потреблением энергии и ресурсов и возможностью использования для различных типов производств.

3. Разработаны практические рекомендации по выбору режимов нанесения дискретного оксидного слоя на режущую кромку инструмента для получения необходимой структуры, обеспечивающей высокую износостойкость: сила тока 390–410 мкА, давление сжатого воздуха 0,2–0,25 МПа, время обработки инструмента из сплавов на основе железа 3 часа; а из твердых сплавов – 4 часа.

4. Разработан способ повышения долговечности лопаток компрессора авиационных ГТД путем восстановления геометрических размеров и износостойкого покрытия антивибрационных полок (патент №2586191).

5. Разработанный технологический процесс нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя на режущий инструмент с помощью коронного разряда находится в стадии внедрения на АО «МПО им. И. Румянцева», АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», АО «ММЗ», ПАО «АК Рубин», ООО «РИП», ООО «ИТМ» и на ООО ТД «КАЙЛАС», что подтверждено соответствующими актами.

Методология и методы испытания

Рентгеноструктурные исследования выполняли с использованием рентгеновского дифрактометра «Сокол-3» в фильтрованном CoK α -излучении. Для микро-рентгеноспектрального анализа использовали электронный микроскоп «JSM-5610 LV».

Металлографический и металлофизический анализ осуществляли с использованием электронно-сканирующей микроскопии, которую выполняли на установке Nysitron TI 750 Ubi.

Для определения физико-механических свойств диффузионного дискретного оксидного слоя были проведены исследования на нанотвердомере Nano-HardnessTesterNHT.

Степень достоверности результатов

Результаты проведенных исследований по упрочнению сложнопрофильного режущего инструмента для качественной обработки деталей используются на предприятиях: ОАО «МПО им. И. Румянцева», АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», ООО «ИТМ», АО «ММЗ», ПАО «АК Рубин», ООО «РИП» и на ООО ТД «КАЙЛАС», а результаты проведенных исследований на деталях используются на АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», ООО ТД «КАЙЛАС». Экономический эффект составил свыше 40 млн. рублей (в ценах 2019 года).

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждена результатами большого объема выполненных экспериментов и исследований, проведенных с использованием современных аналитических методов и аттестованного оборудования.

Связь работы с научными программами, темами:

Диссертационная работа является завершенным циклом исследований по разработке метода нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя, выполненных на протяжении 2000-2015 годов в рамках следующих федеральных целевых программ:

1. «Национальная технологическая база» 2000 – 2011г.г.
2. «Развитие оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на 2007-2010 годы и на период до 2015г.».
3. «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002-2010 годы и на период до 2015г.».

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались на заседании кафедр «Материаловедение», «Технологии и оборудование машиностроения» Московского Государственного Политехнического Университета г. Москва, 2019; на 77 – ой Международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле-тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров» МГМУ (МАМИ) г. Москва 2012; на IV – ой Международной научной конференция «Современное общество: проблемы, идеи, тенденции» г. Ставрополь. 2015; на Научно-техническом конгрессе по двигателестроению (НТКД-2014) г. Москва. 2014; на XLII – ой Международной научно - практической конференции «Инновация в науке» г. Новосибирск. 2015; на XVI – ой Международной научно-практической конференции «Техника и технология: новые перспективны развития» г. Москва. 2015; на Международной научной конференции «Наука XXI века» г. Москва. 2015; на Молодежной научной конференции «XLI Гагаринские чтения» ФГБОУ ВПО (МАТИ) г. Москва. 2015; на IV Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» – г. Челябинск.2018; на XLV Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» г. Москва. (МАИ). 2019; на Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (ICMTMTE 2019), г. Севастополь; на Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» – г. Сочи.2020; на Международной научно-практической конференции «Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2020» - г. Ялта. 2020г.; на Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (ICMTMTE 2020), г. Севастополь.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- при определенных условиях оксидный слой становится неоднородным (дискретным), в котором покрытые участки регулярно чередуются с непокрытыми;
- регулярное нарушение сплошности покрытий не сопровождается ухудшением их свойств, напротив стойкость к износу повышается.

- получение поверхностного диффузионного дискретного оксидного слоя, упрочняющего материал, возможно при низких температурах, вплоть до комнатной;
- при низких температурах возможно образование нестехиометрических оксидов, которые при повышении температуры переходят в стехиометрию, что способствует увеличению прочности поверхностного упрочнения;
- теоретическая модель долговечности образца с диффузионным дискретным оксидным слоем для сравнительной оценки влияния дискретного оксидного слоя и сплошного покрытия на физико-механические свойства поверхностного слоя материала;
- взаимосвязи между составами газовой среды и обрабатываемых материалов, параметрами технологического процесса и структурой формируемого оксидного слоя, обеспечивающего повышение долговечности деталей и инструментов;
- структурные особенности диффузионного дискретного оксидного слоя, связанные с образованием оксидов, на физико-механические и режущие свойства инструментального материала и физико-механические свойства конструкционного материала;
- механизм изнашивания режущего инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем при точении и фрезеровании, состоящий в торможении процессов зарождения и распространения трещин, обусловленный наведением переменного напряженного состояния в поверхностном слое;
- методика и критерий оценки долговечности материалов с дискретным оксидным слоем по величине молярной энергии активации $U_{эф}$;
- метод нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя, как на инструментальный, так и на конструкционный материал, определены оптимальные параметры, увеличивающие долговечность в условиях эксплуатации;
- способ повышения долговечности лопаток компрессора на второй ресурс путем восстановления износостойкого покрытия на антивибрационных бандажных полках;
- оборудование и технология нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя, как на инструментальный, так и на конструкционный материалы.

Публикации и личное участие автора

Личный вклад состоит в определении научного направления исследований, постановке задач, выполнении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, интерпретации и обобщении полученных результатов, формулировке положений, рекомендаций и выводов, и написании научных статей.

Непосредственно автором выполнены следующие работы:

1. Проанализированы методы нанесения покрытий и причины их разрушения на режущем инструменте.

2. На базе анализа причин разрушения покрытия разработана концепция формирования теоретической модели и разработана теоретическая модель диффузионного дискретного оксидного слоя, инструментальных и конструкционных материалов.

3. Для получения диффузионного дискретного оксидного слоя разработано оборудование и технология нанесения.

4. На основе учета многообразия факторов, влияющих на диффузионный дискретный оксидный слой, разработана математическая модель процесса нанесения дискретного оксидного слоя на инструментальный и конструкционный материал и определены оптимальные параметры, увеличивающие долговечность в условиях эксплуатации.

5. На основе полученных результатов исследования кинетической прочности и особенностей разрушения покрытия установлено влияние диффузионного дискретного оксидного слоя на долговечность.

6. На основе созданной технологии получения дискретного оксидного слоя проведены экспериментальные исследования на износостойкость, предела прочности на растяжение, предела текучести и усталостную прочность. Установлены физико-механические свойства диффузионного дискретного оксидного слоя, обеспечивающие повышение долговечности.

7. На основе результатов экспериментальных исследований разработаны рекомендации по выбору технологических параметров нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя.

По теме диссертационной работы опубликовано 61 научная работа; в т.ч. 23 статьи опубликованы в рецензируемых изданиях, входящих в перечень изданий ВАК Минобрнауки России, 5 статей – в изданиях, индексируемых в Scopus и Web

of Science. Получено 5 патентов на изобретение. Издана одна монография в издательстве «Университет машиностроения». Список публикаций по теме диссертационной работы приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, основных выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 283 страницах машинописного текста, содержит 120 рисунков, 29 таблиц, список литературы из 107 наименований, приложения приведены на 14 страницах. Общий объем работы 298 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрены проблемы разрушения режущей кромки инструмента, сформулированы цель и задачи исследования, обозначены направления исследований для решения поставленных задач, отображена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Глава 1. Анализ методов нанесения покрытий на режущий инструмент

В первой главе дан сравнительный анализ способов формирования поверхностного слоя при сплошном и локальном нанесении износостойких покрытий на широко используемый в промышленности режущий инструмент (резцы с механическим креплением четырехгранных пластин из быстрорежущей стали и твердого сплава, а также твердосплавные фрезы). Приведена классификация методов нанесения износостойких покрытий в зависимости от условий их применения. Проанализированы достоинства и недостатки покрытий (поверхностных слоев), формируемых при: химическом и физическом осаждении, ионной имплантации, лазерном и электроискровом упрочнении. Рассмотрены кинетика и механизм изнашивания режущего инструмента с износостойким покрытием. Непосредственными причинами изнашивания контактных площадок инструмента являются интегрально протекающие процессы абразивного, адгезионного, адгезионно-усталостного, коррозионно-окислительного, диффузионного изнашивания. Сформулированы требования, которые следует учитывать для износостойкого покрытия, исходя из условий его разрушения на контактных площадках инструмента и роли в сложных процессах их изнашивания: – способность сопротивляться разрушению при напряжениях до

4000 МПа; – способность покрытия сохранять свои свойства при температуре, возникающей в процессе резания (200–1100 °С); – необходимость одновременно учитывать разную зависимость свойств покрытия и инструментального материала от температуры (модуль упругости коэффициенты Пуассона, линейное расширение, твердость и т. д.).

В результате анализа установлено, что для повышения долговечности режущего инструмента при обработке деталей в машиностроении и двигателестроении, может быть использован метод нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя с поликристаллической структурой, который снижает риск хрупкого разрушения режущего клина инструмента при действии циклических механических и термических нагрузок.

Для достижения поставленной цели работы сформулированы следующие задачи исследования и намечены пути их решения:

- разработать теоретическую модель долговечности образца с диффузионным дискретным оксидным слоем для сравнительной оценки влияния дискретного оксидного слоя и сплошного покрытия на физико-механические свойства поверхностного слоя материала;

- разработать новый метод получения током коронного разряда, при низких температурах (вплоть до комнатной), на поверхности режущего инструмента и деталей из инструментальных и конструкционных материалов диффузионных дискретных оксидных слоев и определены рекомендуемые параметры технологического процесса, увеличивающие долговечность режущего инструмента и деталей в условиях эксплуатации;

- установить влияние химического состава газовой среды и параметров технологического процесса на структуру формируемого оксидного слоя обрабатываемых материалов инструмента и деталей, и влияние структурных особенностей дискретных оксидных слоев на физико-механические и режущие свойства инструментального материала и физико-механические свойства конструкционного материала;

- выявить механизм торможения изнашивания режущего инструмента с дискретным оксидным слоем при точении и фрезеровании;

- разработать методику и критерий оценки долговечности материалов с диффузионным дискретным оксидным слоем по величине молярной энергии активации $U_{эф}$;

- разработать способ повышения долговечности лопаток компрессора на второй ресурс путем восстановления износостойкого покрытия на антивибрационных бандажных полках;

- разработать оборудование и технологию получения диффузионных дискретных оксидных слоев на инструментальных и конструкционных материалах.

Поставленные в работе задачи решались с использованием фундаментальных положений материаловедения, металловедения, технологии машиностроения, теории резания и упругопластического деформирования, теории механической и статистической физики.

Глава 2. Физико-химические основы формирования дискретного диффузионного оксидного слоя на металлическую подложку

Во второй главе разработана теоретическая модель долговечности образца с диффузионным дискретным оксидным слоем, проведена оценка влияния дискретного оксидного слоя на долговечность. Дискретным (или ячеистым) оксидным слоем будем называть геометрически упорядоченную совокупность локальных зон с покрытием и области без покрытия между ними. Одной из мотиваций такого структурирования является возможность использования эффекта торможения, и даже остановки образовавшейся в процессе эксплуатации локальной трещины, за счет создания распространения на границе раздела пониженного значения модуля упругости. Принципиальной особенностью рассматриваемой модели является сопоставление деформации при упругом растяжении сплошного и дискретного оксидного слоя, модуля упругости E и коэффициента Пуассона μ , формально выступающих в роли интегральной характеристики.

В главе приведены справочные данные по E и μ для металлов и их соединений, используемых в качестве покрытий. Проведена оценка влияния диффузионного дискретного оксидного слоя на долговечность образца. Показано, что при фикси-

рованной относительной деформации образца диффузионный дискретный оксидный слой, приводит к увеличению долговечности за счет снижения растягивающих напряжений в областях локальных покрытий.

На основании анализа публикаций отмечено, что результаты рассмотрения вопроса изнашивания контактных поверхностей, взаимодействующих на пятнах фактического контакта, и расчетная схема износа Барзова А.А. были использованы для рассмотрения механизмов изнашивания дискретного (ячеистого) диффузионного покрытия режущего инструмента.

Ввиду отсутствия известных публикаций по сопоставлению свойств сплошных и дискретных оксидных слоев, в качестве первого шага был выполнен теоретический анализ влияния локальности покрытия на прочностные свойства образца при деформации растяжением. Анализ проводился на основе теоретической модели одноосного упругого деформирования образца из произвольного инструментального материала с исходной геометрией прямоугольного параллелепипеда длиной $L_{и}$ шириной $H_{и}$ и толщиной $h_{и}$, рисунок 1. При этом поверхность образца представлена в виде набора условных квадратных ячеек со сторонами l . Каждая ячейка имеет сплошное покрытие размером $l_{п1} \times l_{п2} \times h_{и}$ и область без покрытия $l_{s1} \times l_{s2} \times h_{и}$.

Отметим, что подразумеваемое отсутствие покрытия на боковых гранях, связанных с толщиной образца, означает анизотропию его упругих свойств в отношении поперечных деформаций по ширине $H_{и}$ и толщине $h_{и}$, (см. рисунок 1). Деформации по ширине $H_{и}$ характеризует величина коэффициента Пуассона $\mu_{ипс}$, а деформации по толщине $h_{и}$ определяются только величиной коэффициента Пуассона инструментального материала $\mu_{и}$.

Принципиальной особенностью рассматриваемой модели является сопоставление упругой деформации сплошного покрытия и дискретного оксидного слоя; модуля упругости и коэффициента Пуассона, формально выступающего в роли интегральной характеристики композиции «покрытие-основа». Ячейка образца с дискретным оксидным слоем, объемом $l \times l \times h_{и}$ и модулем упругости $E_{ипс}$, включает в свой состав подъячейку сплошного покрытия в виде прямоугольного параллелепипеда объемом $l_{п1} \times l_{п2} \times h_{и}$ и модулем упругости $E_{ип}$.

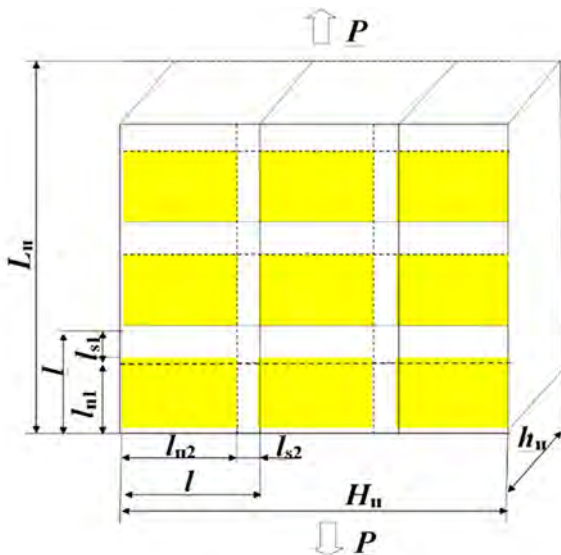


Рисунок 1 - Модель плоского образца с диффузионным дискретным оксидным слоем

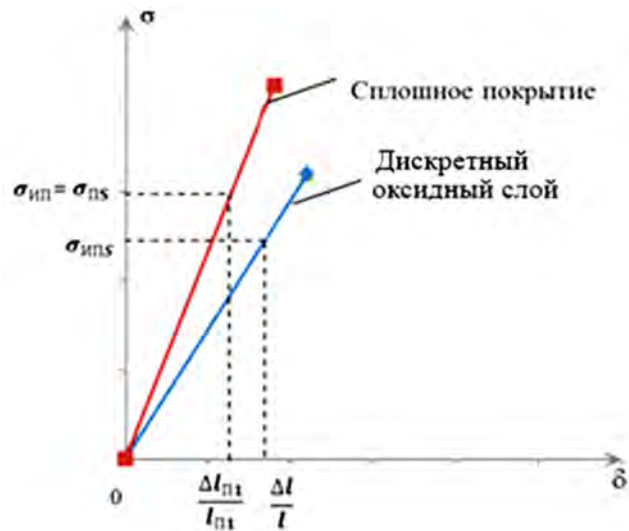


Рисунок 2 - Схема диаграммы растяжения в области упругой деформации для сплошного и диффузионного дискретного оксидного слоя, где: $\sigma_{ПС}$ - растягивающее напряжение, которое действовало бы в образце со сплошным покрытием, если бы его относительная деформация равнялась относительной деформации сплошного покрытия.

Поскольку в процессе обработки на режущий инструмент действуют термомеханические нагрузки, то и на образец была приложена нагрузка P , равномерно распределенная по всему образцу для того, чтобы теоретически сопоставить сплошное и дискретный оксидный слой для упругой деформации при растяжении.

Сопоставление двух геометрически одинаковых образцов показывает, что при одинаковых относительных продольных деформациях ячейки имеют различные продольные деформации: для сплошного покрытия $-\Delta l_{П1}/l_{П1}$, и для оксидного слоя $-\Delta l/l$.

Растягивающие напряжения, действующие на эти ячейки также различны:

$$\sigma_{ип} = E_{ип} \frac{\Delta l_{П1}}{l_{П1}}, \sigma_{ипс} = E_{ипс} \frac{\Delta l}{l}, \sigma_{,ип} = E_{ип} \delta_{П1}, \sigma_{ипс} = E_{ипс} \delta_{ипс}, \quad (1)$$

где: $\sigma_{ип}$ – растягивающее напряжение сплошного покрытия, $\sigma_{ипс}$ – растягивающее напряжение дискретного оксидного слоя; $\delta_{П1} = \Delta l_{П1}/l_{П1}$ – относительная деформация сплошного покрытия; $\delta_{ипс} = \Delta l/l$ – относительная деформация дискретного оксидного слоя; $E_{ип}$ – модуль упругости сплошного покрытия; $E_{ипс}$ – модуль упругости дискретного оксидного слоя.

Эта схема качественно иллюстрирует различия напряжений $\sigma_{\text{ипс}}$ и $\sigma_{\text{ип}}$. Вместе с тем растягивающее напряжение для сплошного покрытия при относительной деформации дискретного оксидного слоя $\sigma_{\text{ипс}}$ равно $\sigma_{\text{ипс}}$ и $\sigma_{\text{ип}}$.

Очевидно, что неравенство $\sigma_{\text{ипс}} < \sigma_{\text{ип}}$ является следствием снижения напряжений, действующих непосредственно на локальные области самого покрытия, что напрямую связано с вопросом увеличения временного интервала, в течение которого покрытие способно без разрушения выдерживать определенную деформацию образца, согласно представлениям кинетической теории прочности.

Использование локальности приводит к уменьшению значения модуля упругости, по сравнению со сплошным покрытием, что способствует улучшению его пластических свойств, релаксации напряжений. Характер влияния локального оксидного слоя на прочностные свойства образца при растяжении, в рамках сделанных допущений, полностью определяется влиянием на прочностные свойства одной элементарной ячейки.

На основе разработанной модели определена долговечность режущего инструмента, установлен временной интервал работы режущего инструмента, обусловленный действием термофлуктуационного механизма разрушения нагруженных межатомных связей.

Характеристикой энергоемкости инструментального материала по отношению к износу служит эффективная молярная энергия активации $U_{\text{эф}}$, определяемая разностью:

$$U_{\text{эф}} = U_0 - \Omega\sigma, \quad (2)$$

где: $U_{\text{эф}}$ - эффективная молярная энергия активации за счет внешних и внутренних сил; U_0 - энергия активации процесса разрушения (без внешней силы); Ω - активационный объем (объем области локализации первичного акта разрушения с учетом влияния на него дефектности материала изделия); σ - приложенное напряжение.

Отождествляя долговечность режущего инструмента t_d с периодом его стойкости получаем выражение для эффективной молярной энергии активации $U_{\text{эф}}$:

$$U_{\text{эф}} = \frac{RT}{0,434} \lg\left(\frac{T_{\text{ст}}}{\tau_0}\right), \quad (3)$$

где: $\tau_0 \approx 10^{-13}$ с (время, считающееся достаточным для разрыва межатомной связи); $T_{ст}$ – стойкость режущего инструмента, сек.; T – среднее значение температуры режущей кромки инструмента по Кельвину; R – газовая постоянная 8,317 Дж/моль град.

Таким образом, кинетический подход к проблеме износа режущего инструмента позволяет на основе единого подхода, путем использования модифицированной формулы Журкова С.Н., установить взаимосвязь между периодом стойкости режущего инструмента $T_{ст}$, средней температурой его режущей кромки T и соответствующей им эффективной величиной молярной энергоемкости $U_{эф}$ процесса износа.

Согласно экспериментальным данным, эффективная молярная энергия активации $U_{эф}$ с диффузионным дискретным оксидным слоем больше, чем эффективная молярная энергия активации $U_{эф}$ с ионно-плазменным покрытием (TiN) на 0,9%, долговечность режущего инструмента выше примерно в 1,5-2 раза, что подтверждено расчетами по формуле (3).

В главе рассмотрены принципы и методика формирования диффузионного дискретного оксидного слоя на рабочих поверхностях инструмента. На основе теоретической модели и формулы долговечности диффузионного дискретного оксидного слоя в качестве эффективной промежуточной среды между инструментальным и обрабатываемым материалами, условий эксплуатации режущего инструмента и причин его отказов в работе, сформулированы положения о повышении долговечности режущего инструмента с оксидным слоем при сохранении запаса пластичности инструмента. Согласно этим положениям, дискретный оксидный слой должен:

- повышать жесткость инструментального материала, но при этом препятствовать поверхностному распространению трещин в покрытии, образующихся под воздействием термомеханических напряжений;
- обеспечить повышение сопротивляемости усталостному разрушению, особенно в условиях повышенных контактных напряжений, циклического нагружения режущей части инструмента (операции прерывистого резания).

Обобщение преимуществ ячеистой структуры износостойкого диффузионного дискретного слоя на контактных площадках режущего инструмента, позволяет сформулировать их в виде следующих рабочих гипотез:

1. Дискретный оксидный слой, сравнительно со сплошным покрытием, обладает способностью к снижению напряжений, приходящихся на локальные композиции покрытия с основой. Облегчению условий их релаксации, а также к частичной компенсации разности физико-механических характеристик между инструментальным материалом и оксидным слоем, что снижает риск хрупкого разрушения режущего клина инструмента при действии циклических нагрузок.

2. Преимущества дискретного оксидного слоя определяется степенью согласования его параметров с параметрами основы, представленной режущим клином из инструментального материала, устанавливаемыми экспериментально.

На основе указанного подхода была сформулирована методика нанесения дискретного оксидного слоя, разработано оборудование и технология для его реализации.

Диффузионный дискретный оксидный слой может быть различным, поскольку для каждого материала формирование покрытия будет носить свой индивидуальный характер, в зависимости от химического состава инструментального материала, (см. рисунок 3 и таблица.1).

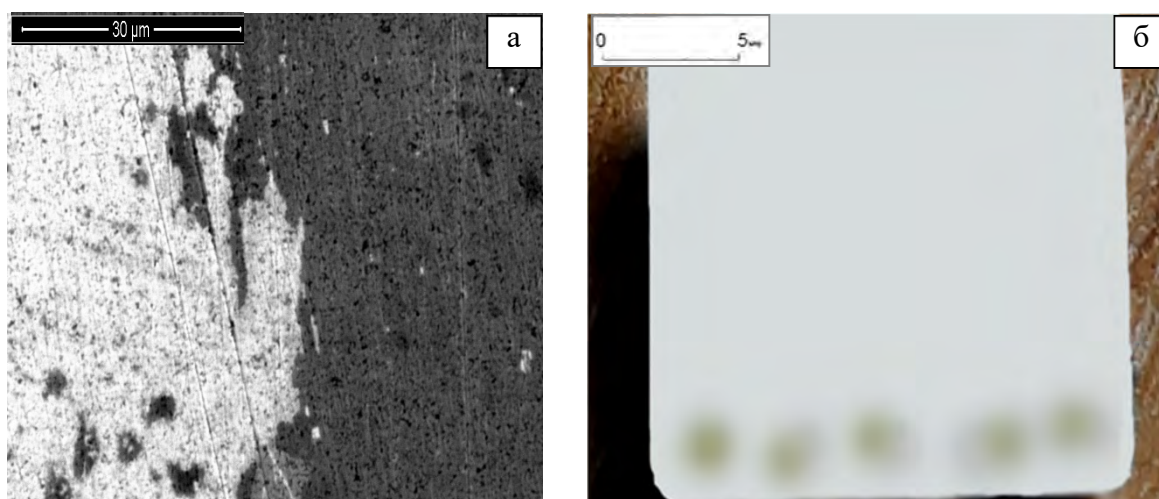


Рисунок 3 – Принципиальная схема структуры дискретного оксидного слоя: а) поверхностная структура упрочнения; б) упорядоченная совокупность локальных зон.

Таблица 1 – Предполагаемые слои дискретного окисления

Наименование слоя	Рекомендуемые композиции
Верхний	Оксидные соединения MeO-O ₂ : Fe _x O(x~0,84-0,96), Fe ₂ O ₃ ; Fe ₃ O ₄ ; WO ₂ (δ); Co ₃ O ₄ (II,III), CoO(II); WO _{2,90} ; WO _{2,72} ; TiO, Ti ₂ O и др.
Промежуточный	Соединения Me-MeO: W-W _x O _{3n-2} , Co-Co _x O _{3n-2} , Ti-Ti _x O _{3n-2} , Fe-Fe _x O _{3n-2} и др.
Нижний	Упрочняющие фазы FeO(α); WO ₃ (α); WO ₃ (β), WO ₃ (γ), TiO(α), и др.

Разработанная для этой технологии экспериментальная установка имеет униполярную положительную корону. Количество положительных ионов, порождаемых ионизацией компонентов атмосферного воздуха, обычно существенно превышает количество отрицательных ионов (доминирующая азотная компонента электроположительна и не образует отрицательных ионов). Это является одной из причин использования в экспериментальной установке униполярной положительной короны, формируемой в привершинной области игольчатого электрода, играющего роль анода (нейтрализатора приходящих на него отрицательно заряженных частиц в виде электронов и отрицательных ионов), находящегося под высоким положительным потенциалом. Принципиальная электрическая схема данной установки показывает, что ток I газоразрядного промежутка замыкается через внешнюю цепь, где в роли его носителей выступают свободные электроны, нейтрализующие заряд положительных ионов, поступающих на электрод. Неоднородность поля, являющаяся необходимым условием возникновения униполярного коронного разряда, приводит к сосредоточению ионизационных процессов в так называемом чехле короны, непосредственно примыкающем к коронирующему электроду и характеризующемуся наличием сильного поля. При атмосферном давлении практически вся энергия, приобретаемая ионами в поле разрядного промежутка, передается в результате соударений молекулам воздуха. Таким образом, ионная активация воздуха увеличивает хемосорбционную активность. Движение положительных ионов в направлении обрабатываемой ими поверхности носит дрейфовый характер. Энергия дрейфового движения ионов оказывается много меньше энергии их теплового движения, но именно дрейфовая скорость является причиной протекания тока во внешней зоне коронного разряда, согласованного с током во внешней цепи электродного промежутка. Изменение условий равновесия поверхностного слоя, не коронирующего электрода с окружающей газовой средой,

в зоне адсорбированных из нее молекул неорганических веществ, инициирует процесс очистки поверхности от загрязнений. Формирование покрытия обусловлено неоднородностью электрических и тепловых полей. Таким образом, происходит локальный нагрев, обусловленный нарушением энергетического баланса за определенное время, идущее на разогрев пятна площадки основания и процесс образования покрытия, осуществляется диффузионно по границам поверхностных зерен.

В качестве рабочей гипотезы воспользуемся изломом в линейной зависимости коэффициента диффузии от величины, обратной безразмерному значению нормированной температуры излома, т.е. в качестве зависимости воспользуемся классическим законом Аррениуса, «температурная зависимость коэффициента диффузии». Для реализации закона была конкретизирована гипотеза существования аномального низкотемпературного излома в линейной зависимости:

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right), \quad (4)$$

где: D_0 и Q – соответственно предэкспоненциальный множитель и энтальпия активации диффузии, зависящие от диффундирующего элемента и материала обрабатываемой поверхности; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/}^\circ\text{К} = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/}^\circ\text{К}$ – постоянная Больцмана.

Эта гипотеза представляет наиболее простой и универсальный способ формализации описания разнообразных низкотемпературных отклонений от закона Аррениуса, носящих монотонный характер. Данная гипотеза «перегиба» объясняет формирования диффузионных покрытий при комнатных температурах. Значение коэффициента диффузии для точки С не может превышать его значения в точке «перегиба» В, (см. рисунок 4). Необходимым условием возможности реализации «перегиба» в точке В является наличие линейности, т.е. точка В̃. Рассчитываемое по закону Аррениуса значение коэффициента диффузии для точки В̃ должно быть больше, чем для точки В. Это означает, что реализация перехода возможна лишь при температуре «перегиба» превышающей минимальное значение температуры. На примере диффузии внедрения углерода в α -Fe при температуре $T=20^\circ\text{C}$, можно

показать, что если температура «перегиба» меньше или равна 1, (см.рис.4), то отсутствует «излом», следовательно, коэффициент диффузии -16,676. Для реализации «перегиба» требуется увеличение температуры. Для коэффициента диффузии -13 температура «перегиба» 1,3, что соответствует температуре 107,9°C. Если коэффициент диффузии -16,676 и соответственно температура «излома» равна 1, то энтальпия активации $Q = 0,617 \text{ эВ}$, а при коэффициенте диффузии -13 и соответственно температура «перегиба» 0,742, то энтальпия активации $Q = 0,688 \text{ эВ}$, и согласно графику зависимости температура «перегиба» линейная, при этом остается неизменным предэкспоненциальный коэффициент диффузии, $D_0 = 0,004 \text{ см}^2/\text{с}$, (см. рисунки 5 и 6).

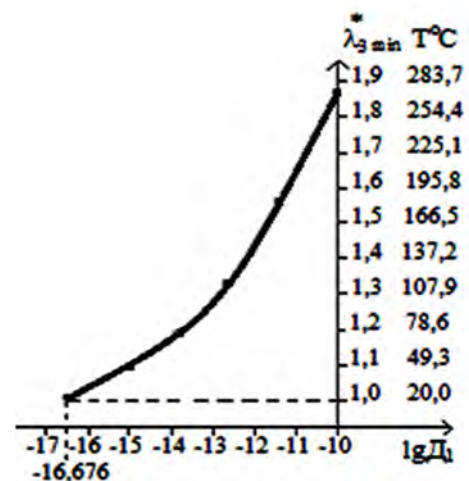
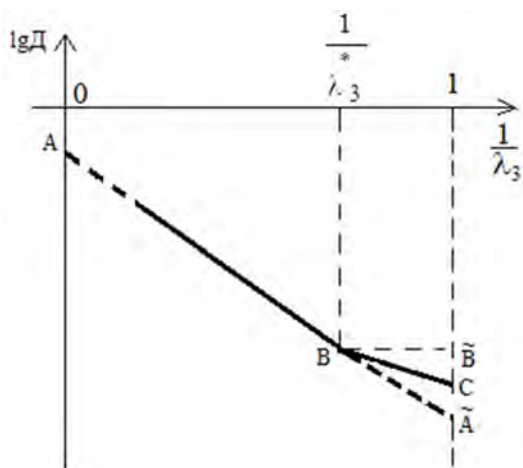


Рисунок 4 - Характеристика «перегиба» в линейной зависимости $\lg D$ от $1/\lambda_3$

Рисунок 5 - График зависимости «перегиба» температуры \min от $\lg D_1$

Диффузионное насыщение поверхности молекулами и ионами активированного электрическим коронным разрядом сжатого воздуха, обладает существенным преимуществом по сравнению с насыщением из парогазовой фазы, так как имеет:

- большую скорость насыщения;
- возможность термодиффузионного насыщения поверхности без дополнительной депассивирующей обработки;
- полную экологическую безопасность процесса обработки;

Наличие в воздухе азота, кислорода и соединений углерода (CO_2) позволяет предположить возможность вхождения в состав покрытия нитридов, оксидов и карбидов, образующихся при синтезе покрытия.

Количество положительных ионов, порождаемых ионизацией атмосферных компонентов, обычно существенно превышает количество отрицательных ионов, поскольку азотная компонента электроположительна и не образует отрицательных ионов, то хемосорбция электроотрицательного кислорода с образованием оксидной пленки будет препятствовать хемосорбции азота и образованию нитридов, что, в свою очередь, облегчает диффузию ионов (или атомов) кислорода через поверхностный слой с образованием диффузионного внутреннего покрытия оксидного типа.

Незначительное содержание оксида углерода (IV) CO_2 в атмосфере, не дает вклада углеродной составляющей в состав покрытия.

Количество положительных ионов, порождаемых ионизацией атмосферных компонентов, обычно существенно превышает количество отрицательных ионов, поскольку азотная компонента электроположительна и не образует отрицательных ионов, то хемосорбция электроотрицательного кислорода с образованием оксидной пленки будет препятствовать хемосорбции азота и образованию нитридов, что, в свою очередь, облегчает диффузию ионов (или атомов) кислорода через поверхностный слой с образованием диффузионного внутреннего покрытия

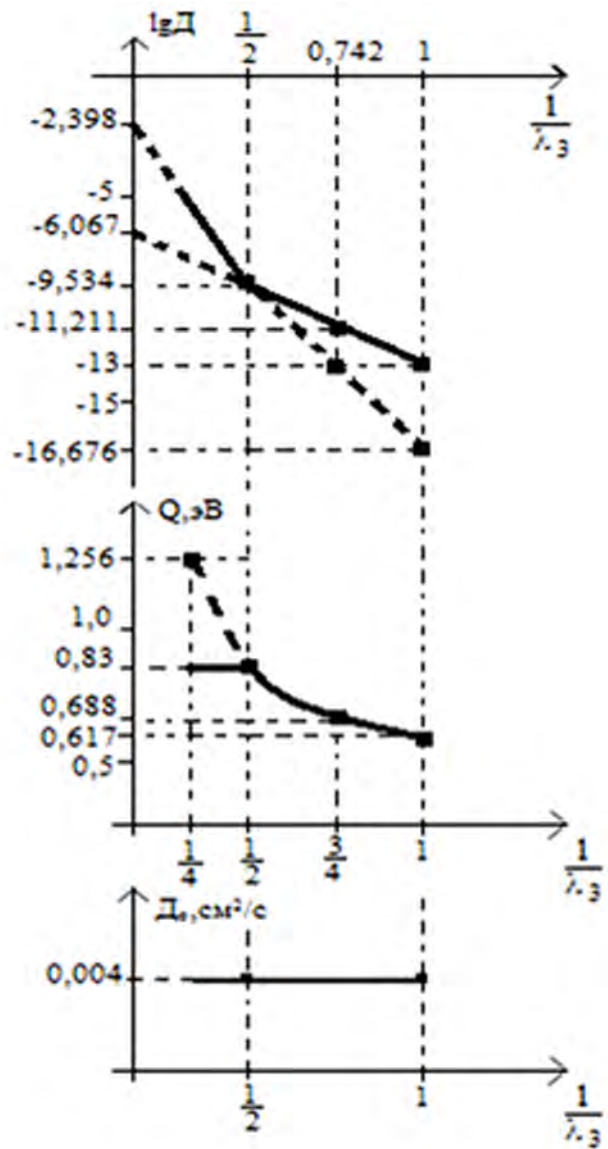


Рисунок 6 – Графики функциональных зависимостей «перегиба» от температуры

оксидного типа. Незначительное содержание оксида углерода (IV) CO_2 в атмосфере, не дает вклада углеродной составляющей в состав покрытия.

Глава 3. Методика проведения экспериментальных исследований

В третьей главе представлены методики: – проведения экспериментальных исследований; – процесса получения дискретных оксидных слоев; – исследования структуры и состава дискретного оксидного слоя; – определения режущих свойств инструмента с оксидным слоем; – исследования физико-механических свойств дискретного оксидного слоя¹.

Комплекс экспериментальных исследований проводился в лабораторных и производственных условиях с использованием современного станочного оборудования. Изучение состава и физико-механических свойств дискретного оксидного слоя выполнялось на основе современных методов металлографического и металлофизического анализов с использованием электронно-сканирующей микроскопии, метода ионопучковой диагностики планарных микро и наноструктур.

Исследование состава дискретного оксидного слоя и распределение элементов по глубине рассеяния проведено на установке «Сокол-3», в институте технологии микроэлектроники РАН (ИПТМ РАН). Ионопучковый аналитический комплекс «Сокол-3» работает по методу ионопучковой диагностики планарных микро и наноструктур, в которых используются потоки ионов H^+ , D^+ , He^+ средних энергий $0,3 \div 3,5$ МэВ.

Химический состав диффузионного дискретного оксидного слоя определяли на электронном микроскопе «JSM-5610 LV» предприятия АО «НПЦ «газотурбостроения «Салют». Наличие низковакуумного режима работы микроскопа позволяет исследовать непроводящие неорганические объекты без проб подготовки и нанесения проводящих покрытий, т.е. получать изображение с реальной поверхности. Наличие двух типов детекторов позволяет получать изображения в режимах вторичных и обратно отраженных электронов. Сканирующий электронный микроскоп JSM-5610 LV оснащен системой

¹Как правило докторские диссертации не содержат методических глав, однако в виду особого внимания, уделенного обоснованию достоверности и сходимости результатов, данная информация была выделена в отдельную главу

химического микроанализа EDX JED-2201, позволяющей производить одновременный автоматический качественный и количественный химический анализ до 99 интересующих участков изображения исследуемого объекта.

Определение механических свойства предел прочности на растяжение конструкционного материала с дискретным оксидным слоем по ГОСТу 1497-64 и на усталость- проводили в соответствии со стандартом по ОСТ100870-77 на АО «НПЦ газотурбостроения «Салют».

Определение твердости, шероховатости и модуля упругости образцов из конструкционного и инструментального материала с дискретным оксидным слоем определяли на сканирующем наноинденторе Hysitron TI 750 Ubi (США).

В качестве критериев оценки долговечности инструмента использовали среднее значение стойкости \bar{T} , коэффициент вариации стойкости ν_T , интенсивность изнашивания J . Оценку коэффициентов вариации стойкости инструмента с дискретным оксидным слоем, со сплошным покрытием и без упрочнения производили с использованием методов математической статистики. Для оценки резко выделяющихся значений стойкости инструмента использовали критерий Гиббса; также приведены основные данные, обосновывающие выбор инструмента (тип, геометрия, марка инструментального материала), обрабатываемого материала, оборудования, аппаратуры для проведения экспериментальных исследований.

Глава 4. Разработка технологии формирования диффузионного дискретного оксидного слоя

В четвертой главе рассмотрены технологические аспекты формирования диффузионного дискретного оксидного слоя, описано оборудование для нанесения дискретного оксидного слоя на режущий инструмент и детали, которое состоит из устройства «УИВ-1» создающего активацию воздушного потока (патент № 2279962) и электромеханического блока, (см. рисунок 7). Устройство «УИВ-1» обеспечивает формирование на поверхности образца локальных областей, а электромеханический блок позволял реализовать упорядоченную совокупность локальных областей с оксидным слоем, разделенных промежутками с его практическим отсутствием, именуемую в работе диффузионным дискретным оксидным

слоем. При формировании дискретного диффузионного оксидного слоя использовали специальный игольчатый анод с жесткой регламентацией.

В качестве материала анода использовали вольфрам. Стержневой электрод диаметром 3,0 мм играет роль анода. Электрод подключен к источнику постоянного напряжения, регулируемому в диапазоне 0 – 16 кВ. Сильная неоднородность электрического поля вблизи «острия» анода обеспечивает условия образования униполярной положительной короны. Заглубление электрода уменьшает влияния краевого поля на выходящий из него активированный воздушный поток. Для формирования дискретного оксидного слоя используется ток коронного разряда и давление сжатого воздуха.

Рассмотрение углов α наклона и расстояния L_c от сопла до обрабатываемой поверхности проводились с учетом формирования пограничной диффузии элементов активированного воздуха для формирования тонкого оксидного слоя. Исследования по оптимизации параметров нанесения локального диффузионного дискретного оксидного слоя проводили в два этапа. На первом этапе использовали двухфакторную модель при принятом допущении, что время является случайным фактором, для выяснения степени влияния основных параметров синтеза оксидирования на износостойкость твердосплавных пластин применительно к точению стали. На втором этапе была использована математическая модель процесса нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя с учетом стохастического характера. Математическое планирование эксперимента для определения числа опытных точек и оптимального расположения их в отведенной для исследований области факторного пространства включало использование указанных параметров.

Диапазон варьирования параметров выбирали таким образом, чтобы идентифицированная модель была справедлива для всей области управления, а значения



Рисунок 7 - Оборудование для формирования дискретного оксидного слоя, оснащенное механизмом крепления деталей

параметров, находящиеся внутри диапазона, были практически реализуемы. Исходя из сказанного, были использованы следующие диапазоны варьирования параметров: $I_k = 140 - 440$ мкА; $p_v = 0,1 - 0,5$ МПа. Расчетные значения параметров модели осуществляли по математической программе «MOD_UNI».

Глава 5. Исследование закономерностей состава и строения диффузионного дискретного слоя

В пятой главе приведены исследования закономерностей состава и строения дискретного оксидного слоя, рассмотрено распределение концентрации элементов дискретного оксидного слоя на различные материалы. Проведены металлографические исследования состава дискретного оксидного слоя: распределение по глубине рассеяния, которые были определены на установке «Сокол-3» в институте технологии микроэлектроники РАН (ИПТМ РАН); по химическому составу, которые были определены на электронном микроскопе «JSM-5610 LV» предприятия АО «НПЦ «газотурбостроения «Салют». Состав дискретного оксидного слоя, распределение элементов по глубине слоя дают возможность судить о динамике процесса насыщения поверхности кислородом. Спектр рассеяния элементов показывает заметные изменения в поверхностном слое основы. Например для быстрорежущего инструмента отмечается смещение дифракционного максимума (110)Fe в области малых углов отражения ($2Q$), что свидетельствует об образовании α - твердого раствора железа, появляются следы β - фазы (FeO). В приповерхностной зоне на глубине проникновения ионного пучка He^+ обнаруживается оксидный слой для быстрорежущей стали, состоящий из $\alpha - Fe_2O_3$. Рентгеноспектральным анализом получено распределение элементов по глубине слоя. В покрытии присутствуют Fe, Cr, W, V, Mo, Co, O, C. На глубине 300нм содержание Fe составляет 76%, тогда как на глубине 5 000нм - 84%. Содержание Cr, W, V, Mo, Co практически не изменялось, в то же время кислород присутствует только в поверхностном слое основы, где его содержание составляет $\sim 0,08\%$ (см. рисунок 8).

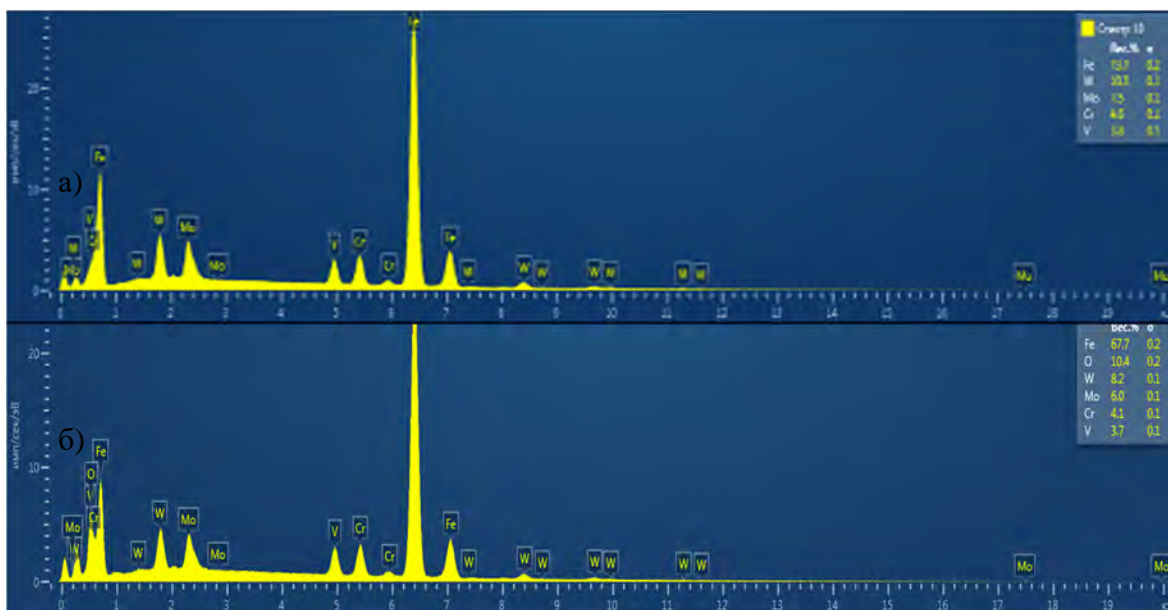


Рисунок 8 – Спектрограмма дискретного оксидного слоя для быстрорежущей стали Р6М5: а) без дискретного оксидного слоя; б) с дискретным оксидным слоем

Объект	O	V	Cr	Fe	Mo	W
Р6М5 (справ. Данные)	0%	1.7-2.1%	3.8-4.4%	83-85%	5-5.5%	5.5-6%
Участок «Спектр 10»	0%	3.84%	4.6%	73.7%	7.5%	10.3%
Участок «Спектр 11»	10.41%	3.74%	4.1%	67.7%	6.0%	8.2%

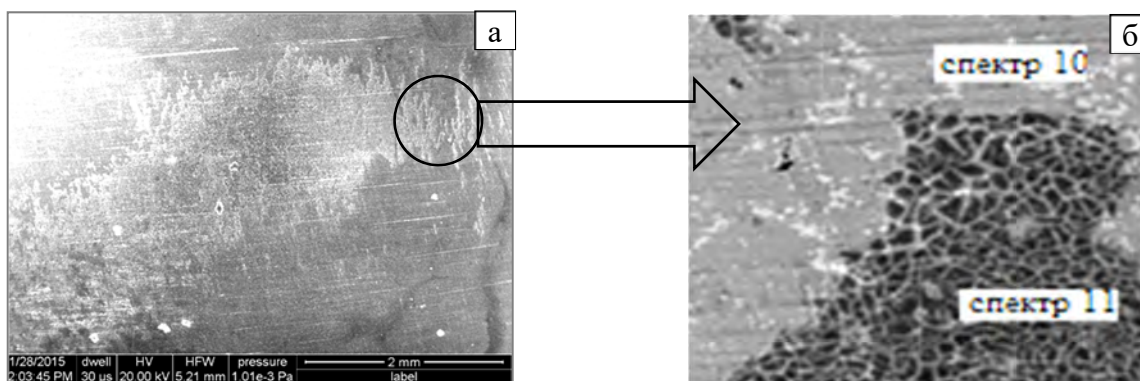


Рисунок 9 – Микроструктура поверхности образца с дискретным оксидным слоем (а - x300; б - x500)

Таким образом, можно утверждать, что уменьшение содержания Fe в поверхностном слое обусловлено протеканием процесса окисления и образованием оксидов Fe_xO_y . Микрорентгеноспектральным анализом, (см. рисунок 8) подтверждено существенное уменьшение содержания Fe в покрытии. Микрорентгеноспектральный анализ, проводившийся на сканирующем электронном микроскопе с пошаговым сканированием, где количество шагов определяет толщину покрытия, показал,

что покрытие, получено диффузионным способом и имеет поликристаллическую структуру, (см. рисунок 9). При этом размер зерна составляет примерно 4 мкм.

С использованием метода локального микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) был исследован химический состав отличающихся по цветам побежалости участков дискретного оксидного слоя на твердосплавном материале ВК10ХОМ и быстрорежущей стали Р6М5. (Разные оттенки цветов побежалости оксидных пленок отвечают разным температурам их формирования, известна шкала соответствия "цвет - температура", синему цвету, например, соответствуют более разогретые участки, желтому – более низкотемпературные участки). Результаты МРСА (в атомных процентах) оксидных слоев в зонах с разными цветами побежалости были соотнесены с известными данными о составе различных оксидных соединений. Это позволило идентифицировать входящие в состав дискретных оксидных слоев на поверхности сплава ВК10ХОМ и стали Р6М5 (см. рис. 10). В том числе установлено, что на поверхности сплава ВК10ХОМ присутствуют оксиды: триоксид вольфрама $WO_3(\alpha)$; $WO_3(\beta)$, $WO_3(\gamma)$; диоксид вольфрама $WO_2(\delta)$; оксид кобальта (II, III) Co_3O_4 и оксид кобальта (II) CoO , а на поверхности стали Р6М5 - оксиды $FeO(\alpha)$; Fe_3O_4 и Fe_2O_3 (см. рисунок 10).

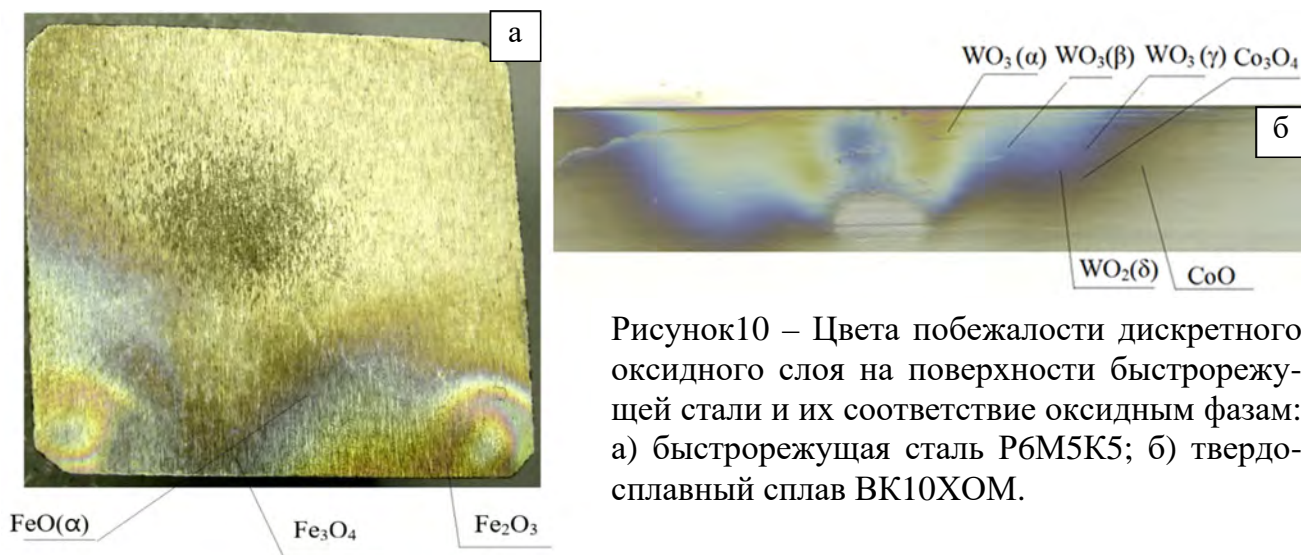


Рисунок10 – Цвета побежалости дискретного оксидного слоя на поверхности быстрорежущей стали и их соответствие оксидным фазам: а) быстрорежущая сталь Р6М5К5; б) твердосплавный сплав ВК10ХОМ.

Изученный дискретный оксидный слой, состоящий из оксидов, имеющий нестехиометрическую структуру, способствует увеличению прочности поверхности инструментального материала, при этом структура основного металла не претерпевает заметных изменений в поверхностном слое.

При повышении температуры оксиды переходят в более стабильное состояние, соответствующее более высокому содержанию кислорода в металле.

Чередование оксидов на поверхности металла связано с разным процентным содержанием кислорода. Вначале, при ионизации молекул кислорода, происходит образование гематита. Затем, по мере возрастания температуры инструмента при механической обработке деталей и снижении концентрации кислорода под слоем гематита образуется слой магнетита и ниже слой вюстита. Таким образом, чем выше температура, тем больше в окалине вюстита и меньше гематита.

Для определения физико-механических свойств диффузионно-дискретного оксидного слоя были проведены исследования на сканирующем нанотвердомере Nano-HardnessTesterNHT (CSMInstruments), по микротвердости, шероховатости и модулю упругости Юнга. В качестве материала для образцов были использованы: быстрорежущая сталь (Р6М5, Р6М5К5), твердосплавный материал (ВК10ХОМ). Согласно ГОСТ 8.748-2011 твердость индентирования H_{IT} рассчитывалась по следующей формуле:

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{(24,5 \cdot h_c^2)}, \quad (5)$$

где $h_c = h_{max} - \varepsilon (h_{max} - h_r)$; $\varepsilon = 0,73$ для пирамиды Беркович, h_r - условная глубина, определяемая по точке пересечения касательной к линии разгрузки диаграммы в начальной ее части (см. рисунок 10)

На рисунке 11 показаны схема диаграмма вдавливания (а) и реальные диаграммы вдавливания (б) для стали Р6М5 с покрытием (1) и без покрытия (2).

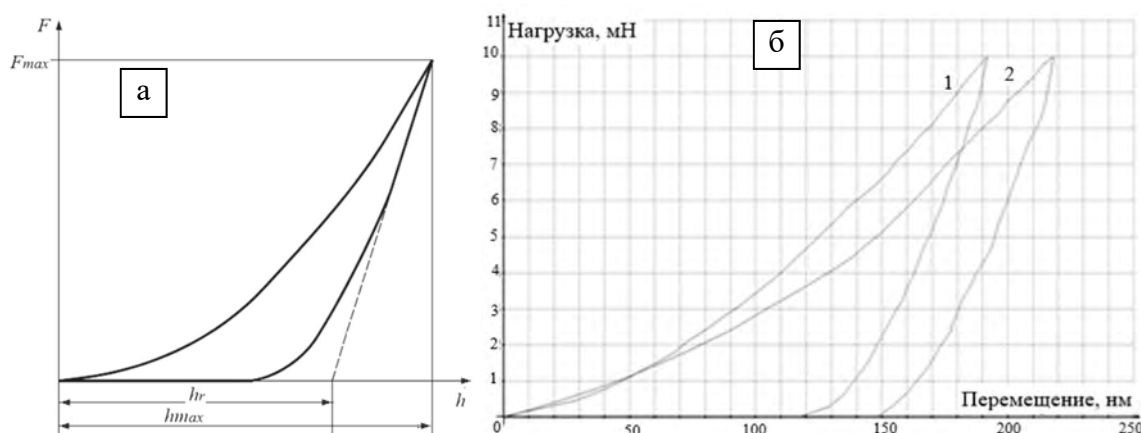


Рисунок 11 – Схема диаграммы вдавливания (а) и реальная диаграмма вдавливания (б) для стали Р6М5 с дискретным оксидным слоем (1) и без дискретного оксидного слоя (2)

Модуль упругости стали Р6М5 с дискретным оксидным слоем и без дискретного оксидного слоя рассчитывался по формуле:

$$E_{IT} = \frac{1-\nu_s^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1-\nu_i^2}{E_i}}, \quad (6)$$

где ν_s и ν_i - коэффициенты Пуассона испытуемого материала и материала индентора соответственно; E_i - модуль упругости индентора; E_r - приведенный модуль упругости.

Согласно ГОСТ 8.748-2011 E_r рассчитывался по формуле:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{(2C \cdot 4,896h_c)} \quad (7)$$

(для пирамиды Берковича); $C = \frac{dh}{dF}$ – податливость вместе контакта.

Результаты определения твердости основного металла (стали Р6М5) и покрытий показали, что значения твердости индентированием дискретного оксидного слоя соответствовали $H_{IT} 0,01/5/10/20 = 16\ 304\ \text{Н/мм}^2$.

Индексы при H_{IT} означают: 0,01- нагрузка, Н; 5 – время приложения нагрузки, с; 10 – длительность выдержки под нагрузкой, с; 20 – время снятия нагрузки, с.

Для основного металла (сталь Р6М5) без дискретного оксидного слоя, среднее значение $H_{IT} 0,01/5/10/20 = 12\ 322\ \text{Н/мм}^2$. Твердость дискретного оксидного слоя превосходила твердость основного металла на 31%.

Модуль упругости стали с дискретным оксидным слоем E_{IT} составляет $301\ 110\ \text{Н/мм}^2$, в то время, как для основного металла $E_{IT} = 199\ 828\ \text{Н/мм}^2$. Таким образом произошло и увеличение E_{IT} , но в большей мере, чем твердость H_{IT} (примерно на 51%).

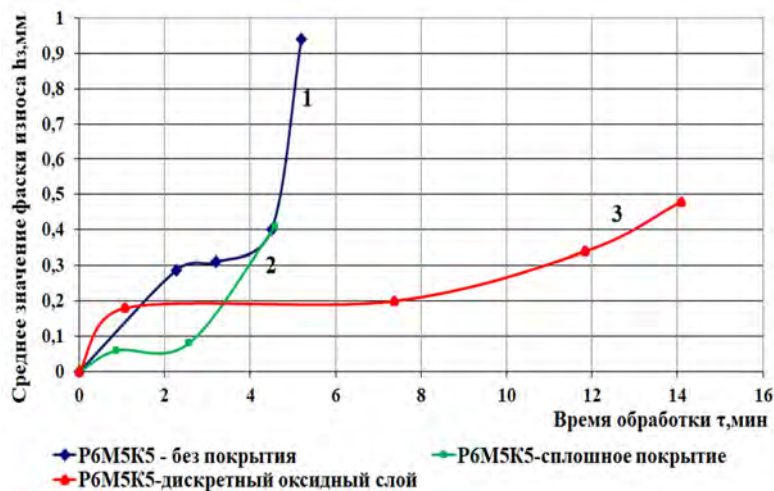
Из графиков, (см. рис. 11) видно, что диффузионный дискретный оксидный слой толщиной 350 – 600 нм позволяет увеличить твердость и модуль упругости. Таким образом, ионы сжатого воздуха, проникая в основу, создают тонкий, но прочный поверхностный слой.

Глава 6. Кинетика и механизм изнашивания режущего инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем

В шестой главе представлены результаты экспериментальных исследований режущих свойств инструмента с механическим креплением пластин из быстрорежущей стали и твердого сплава с дискретным диффузионным упрочнением.

Объектами исследований служили резцы с механическим креплением четырехгранных быстрорежущих пластин производства ОАО «МПО им. И. Румянцева» ирезцы с механическим креплением четырехгранных твердосплавных пластин фирмы «Искар», а также цельные фрезы из твердого сплава ВК10ХОМ производства АО «НПЦ газотурбостроения «Салют».

Для установления кинетики изнашивания резцов с механическим креплением четырехгранных быстрорежущих и твердосплавных пластин с дискретным оксидным слоем были проведены производственные испытания и получены кривые зависимости износа от времени $\bar{h}_3 = f(\tau)$ с соответствующими кривыми для контрольного режущего инструмента и для режущего инструмента с механическим креплением пластин с покрытием TiN, рисунок 12.



а

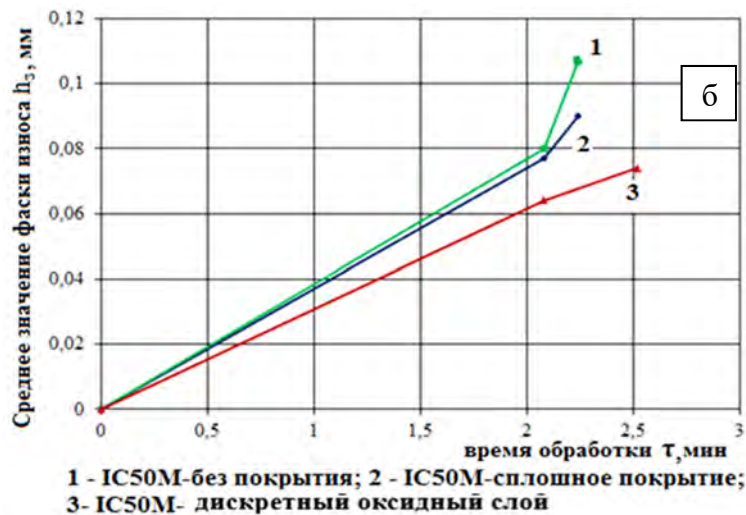


Рисунок 12 – Обобщенные кривые $\bar{h}_3 = f(\tau)$, полученные при продольном точении стали 40X (HB220) резцом с механическим креплением пластины из: а) быстрорежущей стали Р6М5К5: $v = 80$ м/мин; $s = 0,175$ мм/об; $t = 1,0$; б) твердого сплава IC50M: $v = 190$ м/мин; $s = 0,4$ мм/об; $t = 2$ мм

На стадии приработочного изнашивания наблюдается заметное снижение твердости инструмента со сплошным покрытием, в то время как для пластин с дискретным оксидным слоем отмечено полное сохранение уровня твердости локальных объемов инструмента по длине контактных площадок передней и задней поверхностей. На этапе конечной стадии нормального изнашивания, соответствующей наступлению катастрофического разрушения контактных площадок, отмечено удовлетворительное состояние приповерхностных слоев для пластинок с дискретным оксидным слоем. Таким образом, дискретный оксидный слой повышает долговечность режущего инструмента с быстрорежущей пластиной Р6М5К5 при точении стали 40X (HB220) в 4-5 раз по сравнению с контрольным инструментом и в 1,5-3 раз по сравнению со сплошным покрытием; режущий инструмент с твердосплавной пластиной IC50M с дискретным оксидным слоем по сравнению со сплошным покрытием; режущий инструмент с твердосплавной пластиной IC50M с дискретным оксидным слоем при точении стали 40X (HB220) повышает долговечность в 3-4 раза по сравнению с контрольным инструментом и в 1,8-2,5 раза по сравнению со сплошным покрытием.

Производственные испытания проводили при фиксированной величине износа $h_3 = 0,12$ мм для черного фрезерования и $h_3 = 0,5$ мм для чистого фрезерования. В процессе измерения износа, по мере его возрастания, фиксировалось количество обработанных деталей. В ходе производственных испытаний установлено, что износостойкость твердосплавных фрез BK10XOM при фрезеровании титановых

лопаток ВТ6 в 2 раза выше по сравнению со сплошным покрытием и в 1,8 раза выше по сравнению с контрольными фрезами при черновой обработке; в 1,5 раза выше по сравнению со сплошным покрытием и в 1,8 раза выше по сравнению с контрольными фрезами при чистовой обработке и при переточке в 2- 2,5 раза выше относительно контрольных фрез, (см. рисунок13).

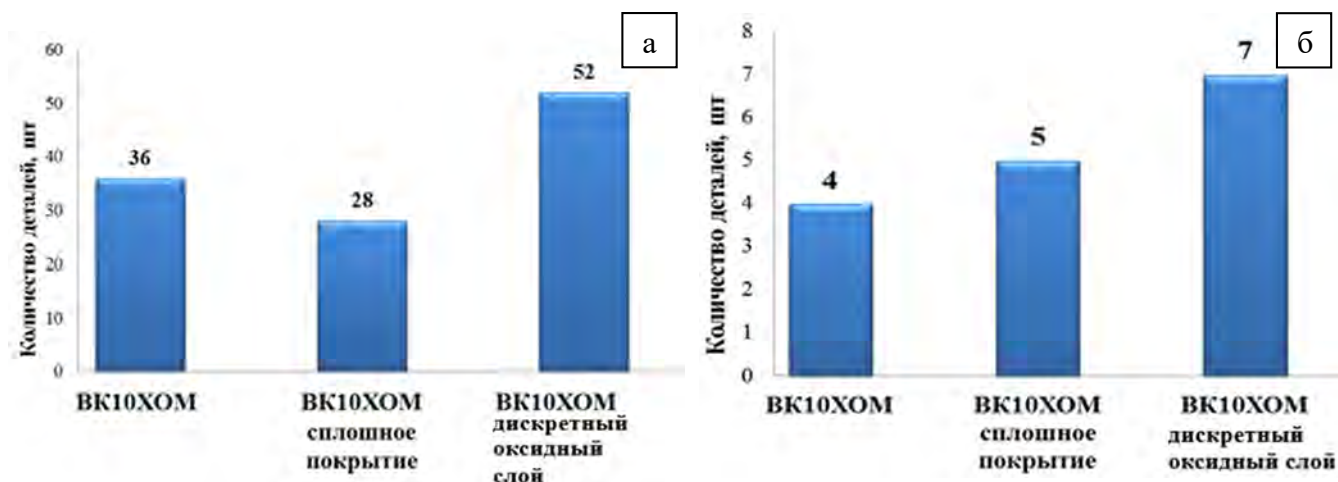


Рисунок 13 – Работоспособность твердосплавных фрез ВК10ХОМ в процессе фрезерования титановых лопаток ВТ6, при фиксированной величине износа h_3 : а) черновое: $n = 1020$ об/мин, $S_M = 490$ мм/мин, $S_z = 0,08$ мм/об, и б) чистовое: $n = 2725$ об/мин, $S_M = 1745$ мм/мин, $S_z = 0,16$ мм/об.

Производственные испытания показали, что фрезы с дискретным оксидным слоем относительно фрез со сплошным покрытием при одинаковом критерии износа h_3 имеют большую продолжительность работы. Разработанная технология нанесения дискретного оксидного слоя позволяет повысить производительность инструмента, примерно, на 20% в сравнении с производительностью режущего инструмента с ионно-плазменным покрытием и на 50%, в сравнении с инструментом без покрытия.

Представлена эффективность применения режущего инструмента с дискретным оксидным слоем и получен экономический эффект от использования режущего инструмента с дискретным оксидным слоем. Получена себестоимость по затратам, по электроэнергии и по материалам. Производственные испытания показали, что режущий инструмент с дискретным оксидным слоем имеет производительность на 15% выше, чем со сплошным, а себестоимость на 400 000,00 руб. меньше по отношению к ионно-плазменному покрытию, что экономически выгодно для производства.

Глава 7. Применение технологии диффузионного дискретного оксидного слоя в промышленности

В седьмой главе рассмотрено, в рамках договора № 356и-116 от 14.05.2013г. с ОАО «НПК Иркут» НИОКТР, повышение надёжности лопаток компрессора на второй ресурс, за счет восстановления основы и упрочнения верхнего слоя. Была разработана промышленная технология восстановления лопаток на второй ресурс, которая внедрена на производстве АО «НПЦГ «Салют»». Рассмотрено промышленное применения технологии нанесения дискретного диффузионного упрочнения на титановые и интерметаллидные образцы лопаток. Согласно государственному контракту № Р/415611221075 (КНР) от 30.12.2015 и по дополнению 015611221560-11 DMAC/SFB577RFк основным требованиям деталей газотурбинных установок, необходимо было решить вопрос по повышению надежности и долговечности, как с интерметаллидными сплавами, так и с титановыми. Поскольку основными повреждающими факторами для лопаток компрессора является изнашивание входных кромок, то одним из направлений, обеспечивающих, увеличение эксплуатационных характеристик был использован метод диффузионного дискретного оксидного слоя, применяемый на заключительной стадии изготовления. В связи с этим были исследованы механические свойства образцов из титановых и интерметаллидных сплавов с дискретным оксидным слоем, а также лопаток из титанового сплава ВТЗ-1 с дискретным оксидным слоем. Сравнительные испытания на растяжение лопаток из титанового сплава ВТЗ-1 показали, что временное сопротивление и предел текучести практически не зависят от вида покрытия - сплошное покрытие или дискретный оксидный слой. Однако испытания на усталость показали, что усталостная прочность образцов с дискретным оксидным слоем на 30% выше, чем у образцов со сплошным покрытием и на 25% выше, чем у контрольных образцов без покрытий, (см. рис.14). Исследования поверхностей разрушения показали, что структура дискретного оксидного слоя препятствует распространению трещин в процессе эксплуатации на границе раздела с материалом (рисунок 15). Рост прочностных свойств, при небольших степенях деформации $\epsilon_{ост}$, обусловлен неоднородностью распределения дефектов решетки по объему. В то же время с ростом $\epsilon_{ост}$ пластичность металла сохраняется, повышается его чувствительность к перегрузкам, уменьшается трещиностойкость, рисунок 15, 2).

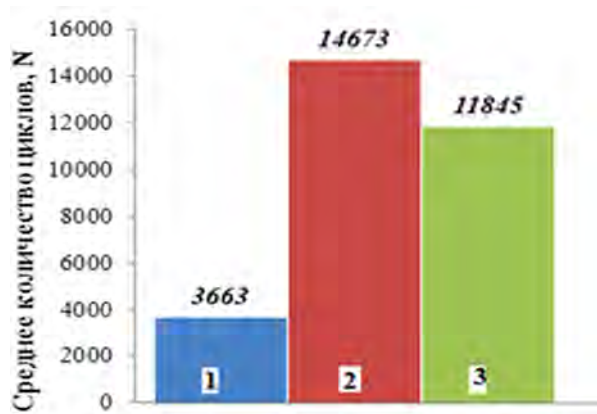


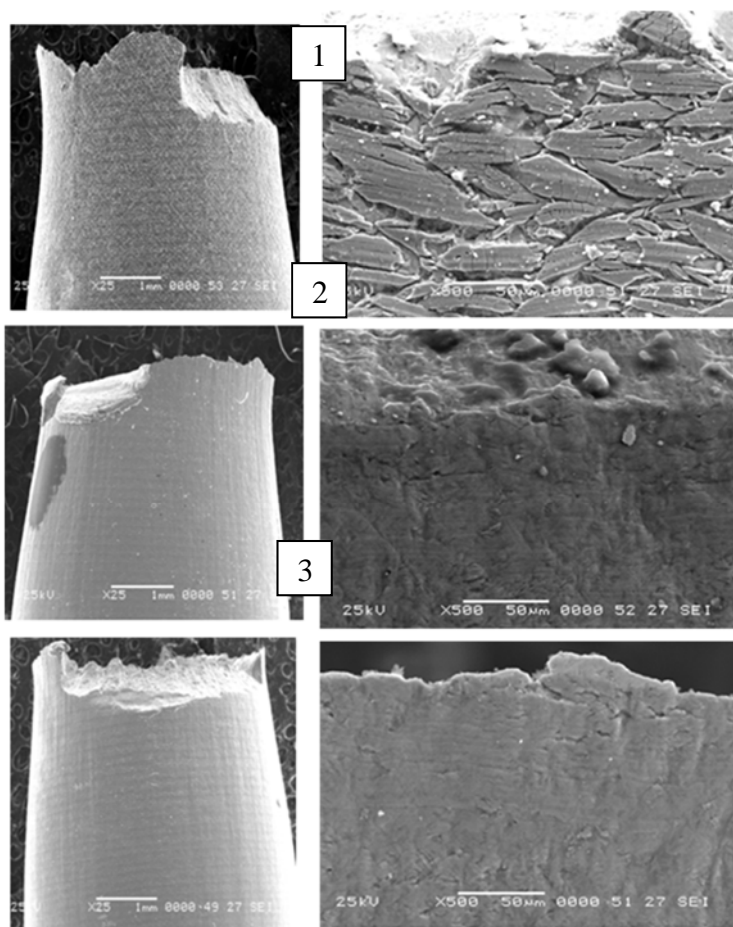
Рисунок 14 - Гистограмма усталостных испытаний на нагрузке $\sigma = 1000\text{МПа}$ образцов из сплава ВТЗ-1 с покрытиями и без:

- 1) сплошное покрытие;
- 2) с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем;
- 3) без покрытия

Рисунок 15 – Влияние покрытий на особенности разрушения при усталостных испытаниях образцов из сплава ВТЗ-1 с покрытиями и без:

- 1) со сплошным покрытием;
- 2) с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем;
- 3) без покрытия.

Разработанная установка для нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя внедрена в производство, в частности, согласно договору №РЗ-07/02/04Р/0404-18 от 10.09.2018г., на предприятии АО «МПО им. И. Румянцева», а также на ООО «ИТМ» и на ООО ТД «КАЙЛАС», а технологию используют на АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», АО «ММЗ», ПАО «АК Рубин», ООО «РИП». Экономический эффект от разработанной технологии одного инструмента составляет не менее 3 000 руб. Разработка защищена патентами: №2250158РФ, №2279962РФ, №2548835РФ, №2586191РФ. Имеются акты внедрения (в приложении).



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана теоретическая модель долговечности образца с диффузионным дискретным оксидным слоем для сравнительной оценки влияния дискретного оксидного слоя и сплошного покрытия на физико-механические свойства поверхностного слоя материала;

2. Разработан новый метод получения током коронного разряда, при низких температурах (вплоть до комнатной), на поверхности режущего инструмента и деталей из инструментальных и конструкционных материалов диффузионных дискретных оксидных слоев и определены рекомендуемые параметры технологического процесса, увеличивающие долговечность режущего инструмента и деталей в условиях эксплуатации

3. Установлены влияние химического состава газовой среды и параметров технологического процесса на структуру формируемого оксидного слоя обрабатываемых материалов инструмента и деталей, и влияние структурных особенностей дискретных оксидных слоев на физико-механические и режущие свойства инструментального материала и физико-механические свойства конструкционного материала

4. Выявлен механизм торможения изнашивания режущего инструмента с дискретным оксидным слоем при точении и фрезеровании.

5. Разработана методика и критерий оценки долговечности материалов с дискретным оксидным слоем по величине молярной энергии активации $U_{эф}$;

6. Разработан способ повышения долговечности лопаток компрессора на второй ресурс путем восстановления износостойкого покрытия на антивибрационных бандажных полках;

7. Разработаны оборудование и технология получения дискретных диффузионных оксидных слоёв на инструментальных и конструкционных материалах, позволяющие:

- повысить износостойкость резцов (с быстрорежущими, а также твердосплавными пластинами) и фрез в диапазоне от 1,5 до 4 раз по сравнению с аналогичным инструментом со сплошным покрытием или без покрытия при различных видах точения и фрезерования.

- увеличить на 30 - 50% пластичность и циклическую долговечность материала деталей, например – из титановых сплавов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ
Список публикаций в рецензируемых журналах, входящих
в перечень ВАК и Scopus

1. *Chekalova E.A* Study of diffusion oxide hardening on intermetallic materials/*E. Chekalova, A. Zhuravlev*//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – 2020. – №889(1) 012001–p.1-7 –ISSN: 1757-8981.
2. *Chekalova E.A* Improving the durability of titanium alloy products through a combined hardening technology/*E. Chekalova, A. Zhuravlev*// Materials Today: Proceedings – 2020. – №33–p.142-147–ISSN: 2214-7853.
3. *E. Chekalova* Discrete oxidation of a Hard Carbide Tool/ *E. Chekalova, A. Zhuravlev*// Book: «Materials Engineering and Technologies for Production and Processing VI» – 2020. p.777-782 – ISSN: 2214-7853.
4. *E. Chekalova* Increasing the wear resistance of a complex profile cutting tool by applying a diffusion discrete coating/*E. Chekalova, A. Zhuravlev*// Materials Today: Proceedings–2019. –№19 –p.2442-2444–ISSN: 2214-7853.
5. *E.A. Chekalova* Restoration of the Wear-Resistant Coatings on a GTE Compressor Airfoil Shroud Platform/*N.V. Abraimov, V.A. Geikin and V.V. Lukina*//Russian Metallurgy (Metally) –2017. – №6 –p. 505-510.–ISSN:0036-0295.
6. *Е.А. Чекалова* Повышение производительности сложнопрофильного инструмента из быстрорежущих сталей за счет дискретного диффузионного упрочнения /*Е.А. Чекалова, А.В. Журавлев* // «Машиностроение и инженерное образование» - 2019. №4(61). – С. 28 – 31
7. *Е.А. Чекалова* Дискретное оксидирование сложнопрофильного инструмента из быстрорежущих сталей/ *Е.А. Чекалова, А.В. Журавлев* // «Упрочняющие технологии и покрытия» – 2019 Том 15. – №12(180). – С. 546 – 549. РИНЦ(на платформе Web of Science ISSN:1813-1336)
8. *Е.А. Чекалова* Исследование строения дискретного оксидного покрытия на быстрорежущем и твердосплавном инструменте / *Е. А. Чекалова* // «Упрочняющие технологии и покрытия» – 2017. – №7. – С. 309 – 313. РИНЦ (на платформе Web of Science
http://www.mashin.ru/eshop/journals/uprochnyayuwie_tehnologii_i_pokrytiya/2016/16/
9. *Е.А. Чекалова* Структура и свойства локального диффузионного покрытия, нанесенного на быстрорежущую сталь /*Е. А. Чекалова* // «Упрочняющие технологии и покрытия» – 2017. – №9. – С. 398 – 402. РИНЦ(на платформе Web of Science
http://www.mashin.ru/eshop/journals/uprochnyayuwie_tehnologii_i_pokrytiya/2016/18/
- 10.*Е.А. Чекалова* Исследование диффузионного локального покрытия оксидного типа на инструментальный материал /*Е. А. Чекалова* // «Материаловедение» – 2017. – № 8. – С. 24 – 29.

11. **Е.А. Чекалова** Исследование износостойких покрытий на титановом сплаве ВТЗ-1/Е. А. Чекалова // «Материаловедение» – 2017. – № 9. – С. 3 – 6.
12. **Е.А. Чекалова** Восстановление износостойких покрытий на бандажных полках лопаток компрессора ГТД /Е. А. Чекалова, Н.В. Абраимов, В.А. Гейкин, В.В. Лукина // Электromеталлургия. –2016. – № 11. – С. 41 – 48.
13. **Е.А. Чекалова** Экологически чистый процесс упрочнения режущего инструмента, повышающего производительность и качество обработки /Е. А. Чекалова, Б. Е. Пини // Тракторы и сельхозмашины. –2015. – № 2. – С. 38 – 42.
14. **Е.А. Чекалова** Повышение износостойкости быстрорежущего инструмента путем нанесения локального диффузионного сетчатого покрытия /Е. А. Чекалова, Н.В. Абраимов // Электromеталлургия. –2015. – № 8. – С. 36 – 42.
15. **Е.А. Чекалова** Повышение износостойкости режущего инструмента путем нанесения сетчатого покрытия / Е. А. Чекалова, П. Д.Чекалов // Журнал известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – №1 (19) т.2. – С. 228 –230.
16. **Е.А. Чекалова** Повышение износостойкости режущего инструмента путем применения диффузионного сетчатого покрытия / Е. А.Чекалова, П. Д.Чекалов // Журнал известия МГТУ «МАМИ». –2014. –№1 (19) т.2. –С. 230 –233.
17. **Е.А. Чекалова** Повышение работоспособности твердосплавного инструмента путем применения активированного воздуха / Е. А.Чекалова, П. Д.Чекалов // Журнал известия МГТУ «МАМИ». – 2013. – №1 (15) т.2. – С. 113–118.
18. **Е.А. Чекалова** Экологически чистая газодинамическая обработка поверхности детали с целью повышения качества / Е. А.Чекалова, П. Д.Чекалов // Журнал известия МГТУ «МАМИ». –2013. –№1 (15) т.2. –С. 119 –123.
19. **Е.А. Чекалова** Механическая обработка с применением активированного воздуха / Е. А.Чекалова, П. Д.Чекалов// Журнал известия МГТУ «МАМИ» – 2012. – №2 (14) т.2. – С. 213-216.
20. **Е.А. Чекалова** Новая технология обработки режущего инструмента путем применения активированного воздуха /Е.А.Чекалова // Журнал известия МГТУ «МАМИ». – 2012. – №2 (14) т.2.– С.216-218.
21. **Е.А. Чекалова** Применение озонирования для экологически чистого резания / Е. А. Чекалова, Н. Н.Ромина // Вестник МГТУ «Станкин» – 2008.– № 2.г.– С.62-65.
22. **Е.А. Чекалова**Разработка технологии механической обработки с использованием озонированной среды / Е. А. Чекалова, В. Д. Гурин, В. И. Власов //Металлообработка – 2005.– № 5.– С.6-7.
23. **Е.А. Чекалова**Высокоэффективная технология механической обработки с использованием озонированной среды /Е. А. Чекалова // Справочник. Инженерный журнал. – 2005.– № 8.– С.31-33.

24. **Е.А. Чекалова** Повышение износостойкости инструмента и основные аспекты проблемы экологии в машиностроении / Е.А. Чекалова // Технология машиностроения. –2005.–№1. – С.26–27.

25. **Е.А. Чекалова** Проблемы экологии в металлообрабатывающем производстве / Е.А. Чекалова // Вестник машиностроения. –2005.–№ 1. – С.69–70.

26. **Е.А. Чекалова** Механическая обработка с использованием озонированной среды / Е.А. Чекалова, В.Д. Гурин, В.И. Власов//Технология машиностроения–2004. –№ 5.– С.22–24.

27. **Е.А. Чекалова**. Механическая обработка с охлаждением озонированной средой /Е. А. Чекалова, В.Д. Гурин//Вестник машиностроения–2004.–№ 10.–С.49-50.

28. **Е.А. Чекалова** Повышение эффективности сверл из быстрорежущей стали с покрытием/ Е. А.Чекалова //Стин. –2001. –№ 7.–С.5–7.

Авторские свидетельства и патенты

29. **Е.А. Чекалова**. Способ формирования износостойкого покрытия на поверхности металлической детали / Е. А. Чекалова, П. Д. Чекалов, Р. Д. Соломатина // Патент 2548835РФнаизобретение, МПКС23С8/36. Опубликовано 20.04.2015г. Патентообладатель: Чекалова Е. А.

30. **Е.А. Чекалова** Устройство для получения озонированного воздуха при резании/ Е. А. Чекалова, В. Д. Гурин// Патент 2279962 РФ на изобретение, МПКВ23Q011/10/. Опубликовано 20.07.2006г. Патентообладатель: Чекалова Е. А. Приоритет изобретения 06.12.2004г.

31. **Е.А. Чекалова** Способ восстановления бандажных полок лопаток турбомашин из титановых сплавов / Е. А. Чекалова,Абраимов Н.В., Гейкин В.А., Ивлев Н.И.// Патент 2586191 РФ на изобретение, МПК В23Р 6/00, В23К 31/02, В23К 103/14. Опубликовано 10.06.2016г. Патентообладатель: АО «НПЦ газотурбостроения «Салют».

32. **Е.А. Чекалова** Способ токарной обработки детали / Е. А. Чекалова, П. Д. Чекалов, Р. Д. Соломатина // Патент 2549818 РФ на изобретение, МПК В23В1/00, В23Q11/10. Опубликовано 27.04.2015г. Патентообладатель: Чекалова Е. А.

33. **Е.А. Чекалова** Устройство для сухого резания/ Е. А. Чекалова, В. Д. Гурин// Патент2250158 РФ на изобретение, МПКВ23Q011/10. Опубликовано 20.04. 2005г. Патентообладатель: ГОУВПО МГТУ «Станкин». Приоритет изобретения 25. 12. 2002г.

Монографии и учебно-методические труды

34. **Е.А. Чекалова** Интенсификация обработки: учебное пособие / Е. А.Чекалова. – М.: Изд-во ГОУ ВПО МГТУ «Станкин», 2007. –127 п. с. Допущено Учебно-методическим объединением вузов по образованию в области автоматизированного машиностроения (УМО АМ) в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений.

35. **Е.А. Чекалова** Технологические процессы электрофизических и электрохимических методов обработки: учебное пособие / Е. А.Чекалова. – М.: Изд-во ГОУ ВПО МГТУ «Станкин», 2007. – 204п.с.Допущено Учебно-методическим объединением вузов по образованию в области автоматизированного машиностроения (УМО АМ) в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений.

36. **Е.А. Чекалова** Повышение долговечности режущего инструмента и тяжело нагруженных деталей методом нанесения диффузионного сетчатого покрытия: монография / Е. А. Чекалова; под ред. Е. А. Чекаловой. – М.: Изд-во Университет машиностроения, 2014. – 127 п. с.

Публикации в сборниках трудов конференций

37. **Е.А. Чекалова** Повышение износостойкости сложнопрофильного инструмента в машиностроении/ Чекалова Е.А., Твердохлебов А.С.// Сб. трудов IV Международная научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» – г. Челябинск – 2018. С.221– 224.

38. **Е.А. Чекалова** Повышение долговечности режущего инструмента в промышленном производстве/ Чекалова Е.А., Марченкова Т.В.// Сб. трудов IV Международная научно-технической конференция «Пром-Инжиниринг» – г. Челябинск –2018. С.217– 221

39. **Е.А. Чекалова** Повышение долговечности изделий из титановых сплавов путем нанесения локального оксидного покрытия/ Е.А. Чекалова//Нанотехнологии: наука и производство. – 2017. – №3. – С.29-37.

40. **Е.А. Чекалова** Повышение износостойкости твердосплавных фрез путем нанесения диффузионного сетчатого покрытия / Е.А. Чекалова, Ю.В. Максимов // Сб. трудов конференции. XLII – ая Международная научно-практическая конференция «Инновация в науке» –Новосибирск.: НП «СибАК». – 2015. – С. 58 – 65.

41. **Е.А. Чекалова** Повышение долговечности режущего инструмента путем применения сетчатого покрытия / Е. А. Чекалова // Сб. трудов конференции.XVI – я Международная научно-практическая конференция «Техника и технология: новые перспективны развития» М.: Изд-во «Спутник+». – 2015. – С. 24 – 28.

42. **Е.А. Чекалова** Процесс упрочнения режущего инструмента путем нанесения сетчатого покрытия, повышающего производительность обработки / Е. А. Чекалова, Б. Е Пини // Сб. трудов конференции. Международная научная конференция «Наука XXI века» М.: Изд. центр «Рус Альянс Сова». – 2015. – С. 145 – 152.

43. **Е.А. Чекалова** Повышение долговечности режущего инструмента и «образца детали» путем нанесения локального диффузионного покрытия сетчатого типа/ Г.Г. Сурков, Д.А. Шаталин. – Научный руководитель Е. А. Чекалова // Сб. трудов конференции. Международная молодежная научная конференция «XLI Гагаринские чтения» М.:ФГБОУ ВПО (МАТИ). – 2015. – С. 109 – 111.

44. **Е.А. Чекалова.** Повышение долговечности режущего инструмента в машиностроении /Е. А. Чекалова // Сб. трудов конференции. IV – ая Международная научная конференция «Современное общество: проблемы, идеи, инновации» Ставрополь: Центр научного знания «Логос». – 2015. – С. 97 – 101.

45. **Е.А. Чекалова.** Повышение износостойкости режущего инструмента путем применения интенсивного активирования воздуха / Е.А. Чекалова //Сб. трудов конференции. Научно-технический конгресс по двигателестроению (НТКД-2014) М.: Изд-во ФГУП «НППГ «Салют». – 2014. – С. 231 – 234.

46. **Е.А. Чекалова** Механическая обработка с применением активированного воздуха /Е.А. Чекалова, П.Д. Чекалов// Сб. трудов конференции. 77-я Международная научно-техническая конференция ААИ «Автомобиле – тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров» – М.: МГТУ «МАМИ». – 2012. – С. 182 – 185.

47. **Е.А. Чекалова** Экологически чистая технология в машиностроении/ Е. А. Чекалова, Н. Н. Ромина //ИТО: инструмент-технология-оборудование. –2008. – № 3. –С.74 – 76.

48. **Е.А. Чекалова** Проблемы экологии в металлообрабатывающем производстве / Е.А. Чекалова// ИТО: инструмент-технология-оборудование. – 2005.– № 4.– С. 30 – 32.

49. **Е.А. Чекалова** Технология механической обработки в озонированной среде /Е. А. Чекалова, Н. Н. Ромина //ИТО: инструмент-технология-оборудование. – 2005. – № 9. – С. 21 – 22.

50. **Е.А. Чекалова** Разработка концепции, оборудование и технология комбинированной ионно-плазменной обработки режущего инструмента /Е.А. Чекалова, А.С. Верещака, Л.Г. Дюбнер // Сб. трудов научного симпозиума «Интерпартнер – 96» «Высокие технологии в машиностроении». – Харьков.ХГПУ. –1996. – С.177 – 186.

51. **Е.А. Чекалова** Повышение эффективности лезвийной обработки применением экологически чистых сред / Е. А. Чекалова, А. С. Верещака, А. К. Кириллов// Сб. трудов научного симпозиума: «Интерпартнер – 97» «Высокие технологии в машиностроении. Тенденции развития, менеджмент, маркетинг». - Харьков.ХГПУ. –1997.С.45 – 46.

52. **Е.А. Чекалова.** Основные аспекты применения совершенствования режущих инструментов с износостойкими покрытиями/ Е.А. Чекалова, А.С. Верещака, Ф. Лират, Л. Дюбнер // Сб. трудов научного симпозиума «Интерпартнер-98» «Высокие технологии в машиностроении». – Харьков.ХГПУ.– 1998. – С.21 – 24.

53. **Е.А. Чекалова** Повышение эффективности сверл из быстрорежущей стали путем комбинированной ионно-плазменной обработки /Е. А. Чекалова, А.С. Верещака // Сб. трудов научного симпозиума «Интерпартнер – 2000» «Резание и инструмент в технологических системах». – Харьков. ХГПУ. – 2000. – С.250 – 253.

54. **Е.А. Чекалова** Разработка методики повышения эффективности сверл из быстрорежущей стали с покрытием /Е. А. Чекалова // «IV международный конгресс» «Конструкторско-технологическая информатика 2000». – М.: Изд-во ГОУ ВПО МГТУ «Станкин». – 2000. – С.247 – 249.

55. **Е.А. Чекалова** Азотирование в плазме несамостоятельного газового разряда – метод повышения эффективности инструмента из быстрорежущей стали /Е.А. Чекалова // Сб. трудов XI Международного научно-технического семинара. – Харьков. – НТУ «ХПИ». – 2001. – С. 223 – 227.

56. **Е.А. Чекалова** Повышение эффективности процесса ионного азотирования инструмента из быстрорежущей стали /Е. А. Чекалова // «II Международная конференция» «Прогрессивная техника и технология – 2001» – Киев. Севастополь. – 2001. – С. 78 – 80.

57. **Е.А. Чекалова** Азотирование в плазме несамостоятельного газового разряда – метод улучшения экологии и повышения эффективности инструмента из быстрорежущей стали /Е.А. Чекалова // Сб. трудов конференции. «Международная научно-практическая конференция 2001» – М.: Изд-во ГОУ ВПО МГТУ «Станкин». – 2001. – С.798 – 802.

58. **Е.А. Чекалова** Повышение эффективности быстрорежущего инструмента путем применения, ионизированного воздуха / Е. А. Чекалова, В. И. Власов // Сб. трудов конференции: «Международная конференция» «Производство, технология, экология – 2003». – М.: МГТУ «Станкин». – 2003. – С. 666 – 667.

59. **Е. Chekalova** Badania wlasciwosci tribologiczne z nanoszonymi pokryciami / E. Chekalova, С. Grigorjew, М. Jenek, W. Serebriakow // Сб. научных трудов конференции: «Международная научно-практическая конференция – 2005» «Производство. Технология. Экология». – М.: МГТУ «Станкин». – 2005. – С.612-616.

60. **Е.А. Чекалова** Качество инженерного образования / Е. А. Чекалова, Ю.В. Подураев // Сб. трудов конференции. «Международная научно – методическая конференция – 2008» «Управление качеством инженерного образования и инновационные образовательные технологии». – Москва. МГТУ им. Н. Э. Баумана – 2008. – С.93 – 97.

61. **Е.А. Чекалова** Пути реализации интегрированной системы подготовки кадров для производства /Е.А. Чекалова // Сб. трудов конференции. «Международная конференция – 2009» 9-й юбилейный международный Форум «Высокие технологии XXI века». – Москва. ВК ЗАО Экспоцентр. – 2009. – С. 659 – 663.