МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

На правах рукописи

Чекалова Елена Анатольевна

НАУЧНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ДЕТАЛЕЙ ДИСКРЕТНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ ОКСИДНЫХ СЛОЕВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Специальность 05.16.06 «Порошковая металлургия и композиционные материалы»

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Овчинников Виктор Васильевич

Москва – 2021

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ.....13
1.1 Анализ методов повышения долговечности режущего инструмента путем нанесения на него покрытия.....13
1.2 Классификация методов нанесения износостойких покрытий в зависимости от условий их применения.....15
1.2.1 Метод химического осаждения покрытий.....16
1.2.2 Метод физического осаждения покрытий.....17
1.2.3 Ионная имплантация.....19
1.2.4 Лазерное термоупрочнение.....21
1.2.5 Электроискровое упрочнение инструмента.....24
1.3 Применение износостойких покрытий…….....28
1.4 Кинетика и механизм изнашивания режущего инструмента с износостойким покрытием.....30
1.5 Цель и задачи исследований.....53
ГЛАВА 2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНОГО ДИФФУЗИОННОГО ОКСИДНОГО СЛОЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ПОДЛОЖКУ.....55
2.1 Разработка теоретической модели долговечности образца с диффузионным дискретным оксидным слоем.....57
2.2 Теоретические предпосылки формирования диффузионного дискретного оксидного слоя на рабочие поверхности инструмента.....84
2.3 Особенности диффузионного процесса при формировании дискретного оксидного слоя…….....108
2.4 Физико-химические закономерности формирования диффузионного дискретного оксидного слоя….....124
2.5 Разработка методики и критерии оценки долговечности материалов с диффузионным дискретным оксидным слоем.....137
Выводы по главе.....140

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИИЙ……..142
3.1 Методика проведения процесса диффузионного дискретного оксидного слоя…….....142
3.2 Методы исследования структуры и состава диффузионного дискретного оксидного слоя……..145
3.3 Методика определения режущих свойств. Оборудование, инструмент, обрабатываемый материал.....150
3.4 Методика исследования физико-механических свойств диффузионного дискретного оксидного слоя. Оборудование и обрабатываемый материал……..…..156
Выводы по главе.....162
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ДИФФУЗИОННОГО ДИСКРЕТНОГО ОКСИДНОГО СЛОЯ.....164
4.1 Оборудование и особенности технологии диффузионного дискретного оксидного слоя…..…….....165
4.2 Исследование технологических факторов диффузионного дискретного оксидного слоя на материалах…….....171
4.3 Математическое моделирование процесса формирования диффузионного дискретного оксидного слоя на поверхности материала…….....173
Выводы по главе.....179
ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СОСТАВА И СТРОЕНИЯ ДИФФУЗИОННОГО ДИСКРЕТНОГО ОКСИДНОГО СЛОЯ.180
5.1 Распределение концентрации элементов диффузионного дискретного оксидного слоя на материалы.....180
5.2. Исследование химического состава диффузионного дискретного оксидного слоя на материалы…….....187
5.3 Исследование фазового состава диффузионного дискретного оксидного слоя на материалы…….....194
5.4 Исследование физико-механических свойств материалов с диффузионным дискретным оксидным слоем.....199
Выводы по главе.....209

ГЛАВА 6. КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ ИЗНАШИВАНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ДИФФУЗИОННЫМ ДИСКРЕТНЫМ ОКСИДНЫМ СЛОЕМ ……...210
6.1 Исследование режущих свойств инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем.....210
6.1.1 Методика исследований.....210
6.2. Исследование параметров процесса резания и режущих свойств инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем.....212
6.2.1 Исследования параметров резания и режущих свойств инструмента при продольном точении.....213
6.2.2 Исследование параметров резания и свойств инструмента при фрезеровании…….....223
6.3 Оценка экономического эффекта и эффективность применения режущего инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем……..…227
Выводы по главе.....231
ГЛАВА 7. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИФФУЗИОННОГО ДИСКРЕТНОГО ОКСИДНОГО СЛОЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....234
7.1 Промышленная реализация деталей за счет износостойких покрытий.....234
7.2 Прочность образцов из интерметалидов и титановых сплавов с диффузионным дискретным оксидным слоем.....247
7.3 Усталостные испытания образцов из титанового сплава с диффузионным дискретным оксидным слоем.....263
7.4 Промышленная реализация результатов исследований инструментального материала с диффузионным дискретным оксидным слоем…….....267
Выводы по главе.....270
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....271
ЛИТЕРАТУРА.....273
ПРИЛОЖЕНИЕ Копии актов о внедрении результатов диссертационной работы…….....283

ВВЕДЕНИЕ

В планах развития науки, техники и технологий в сфере наращивания ресурса предполагается создание новых методов и технологий по увеличению ресурса изделий и долговечности инструмента, предназначенного для изготовления и обработки спецматериалов. Научные исследовательские работы, выполняемые по государственным программам перспективных авиационных комплексов, входят в перечень первоочередных задач современного авиационного материаловедения и технологии. От их решения зависит прогресс в двигателестроении и смежных областях промышленности в целом, а также получение ряда инновационных теоретико-прикладных разработок в области материаловедения.

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, позволяющим получать оптимальные физико-механические свойства.

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 процессе 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, E. Anschuz и других.

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 материалов.

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, 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.

Цель работы повысить технологические и эксплуатационные свойства инструментов и деталей путем разработанного и исследованного нового метода поверхностного диффузионного дискретного оксидного слоя током коронного разряда.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- 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;

- 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;

- установлено 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;

- выявлен механизм торможения изнашивания режущего инструмента с дискретным оксидным слоем при точении и фрезеровании.

- разработаны методика и критерий оценки долговечности материалов с диффузионным дискретным оксидным слоем по величине молярной энергии активации Uэф;

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

- разработано оборудование и технология получения диффузионных дискретных оксидных слоев на инструментальных и конструкционных материалах.

Разработан новый метод получения током коронного разряда, при низких температурах (вплоть до комнат-ной), 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. Разработаны практические рекомендации по выбору режимов нанесения дискретного оксидного слоя, обеспечивающие получение необходимой структуры и свойств диффузионного дискретного оксидного слоя, формируемого на режущей кромке инструмента.

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

Разработан экологичный способ создания диффузионного дискретного оксидного слоя на режущем инструменте и оборудование для его нанесения (патент № 2279962), обеспечивающие высокую производительность, энерго - и ресурсосбережение, который рекомендован к внедрению на ООО «ИТМ», на АО «ММЗ», на ПАО «АК Рубин», на ООО «РИП» и на ООО ТД «КАЙЛАС», а внедрен на ОАО «МПО им. И. Румянцева», АО «НПЦ газотурбостроения «Салют». Выработаны рекомендации по составу композиций оксидных дискретных покрытий по слоям для повышения долговечности материала.

Установлено повышение циклической долговечности изделий из титановых сплавов с дискретным оксидным слоем на 30 – 50% относительно сплошного покрытия.

В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследования. В соответствии с поставленной целью работы сформулированы основные задачи исследования. Поставленные в работе задачи решались с использованием фундаментальных положений материаловедения, технологии машиностроения, теории резания и упругопластического деформирования, теории механической и статистической физики, разработаны рабочие гипотезы и методика. Комплекс экспериментальных исследований проводился в лабораторных и

производственных условиях с использованием современного станочного оборудования. Изучение химического состава газовой среды влияющей на формирование оксидного слоя, на физико-механических свойства материала выполняли на основе современных методов металлографического и металлофизического анализов с использованием методик электронно-сканирующей микроскопии, по методу ионопучковой диагностики планарных микро и наноструктур (ионопучковый аналитический комплекс «Сокол-3»).

Статистическая обработка, полученных результатов исследований, проводилась с использованием персонального компьютера.

При проведении процедуры формирования дискретного оксидного слоя на материал, использовали методику замера концентрации озона и прибор «Газоанализатор 3.02- П-Р».

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 научные положения, 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;

На защиту также выносится:

- 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 Uэф;

- 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.

Научная новизна работы заключается в том, что:

- установлено, что при обработке током коронного разряда в диапазоне $I_К$ =140–440мкА при температуре 20–25ºС на поверхности инструментальных и конструкционных материалов Р6М5, Р6М5К5, ВК10ХОМ, ВТ3-1 происходит образование дискретных оксидных слоев состава (Fe_xO(x~0,84–0,96), Fe_2O_3;Fe_3O_4;WO_2(δ); Co_3O_4(II,III), CoO(II);$WO_{2,90}$; $WO_{2,72}$;TiO,Ti_2O).

- 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 $\rho_i^+ \sim К_i^+ \cdot \rho_C = (1{,}23–12{,}3)\cdot 10^{-3}$ мг/м^3 и $n_i^+ \sim К_i^+ \cdot n_C = (2{,}547–25{,}47)\cdot 10^{16}$ 1/м^3, соответственно.

- 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.

- в качестве характеристики энергоемкости инструментального материала по отношению к износу предложена эффективная молярная

энергия активации $U_{ЭФ}$. Установлена 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.

- 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~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.

- 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.

- 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.

- 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 ВК10ХОМ – снижению износа задней поверхности зуба на 40% (с 0,20 до 0,12 мм) при черновом фрезеровании титановых лопаток из сплава ВТ6.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

1.1 Анализ методов повышения долговечности режущего инструмента путем нанесения на него покрытия

В современном металлообрабатывающем производстве все большее применение находит сложное автоматизированное станочное оборудование, управляемое от персонального компьютера. Эффективное использование такого оборудования возможно только при достаточной надежности его функционирования, причем среди многих причин отказов станочного оборудования главными являются отказы режущего инструмента, который является наиболее слабым звеном технологической системы СПИД. Для повышения долговечности режущего инструмента и технологической системы в целом, обычно резко снижают режимы его эксплуатации (например, уменьшают скорость резания), реализуя, таким образом, условия при которых возрастает нестабильность стружкообразования и контактных процессов, что в свою очередь увеличивает вероятность случайного отказа инструмента, например, в результате макро - или микрохрупкого разрушения. Обычно под долговечностью режущего инструмента понимают способность сохранять работоспособность в течение заданного времени, причем объективным критерием, определяющим надежность режущего инструмента, является вероятность его безотказной работы [6, 10, 11]. При этом отказ может оказаться внезапным (микрохрупкое или вязкое разрушение режущей части режущего инструмента) или постепенным (микроразрушение контактных площадок). При известном законе распределения времени наработки на отказ объективными критериями надежности режущего инструмента может служить среднеарифметическое значение времени наработки на отказ и коэффициент вариации этого времени

[10, 11]. Наибольшее влияние на долговечность режущего инструмента оказывают его физико-механические свойства [6, 11,12].

Наиболее эффективным путем формирования требуемых свойств приповерхностных слоев инструментального материала является применение современных методов механического, физико-химического упрочнения, нанесения износостойких покрытий и комплексной поверхностной обработки.

В настоящее время, более 45% в России и 25%-30% в экономически развитых странах, режущего инструмента изготовляют из быстрорежущей стали несмотря на то, что режущий инструмент из твердого сплава, керамики и сверхтвердых синтетических инструментальных материалов обеспечивает более высокую производительность резания. Это связано как со значительно большей технологичностью быстрорежущих сталей, которые хорошо обрабатываются в отожженном состоянии, так и возможностью изготовления сложнопрофильного и крупногабаритного режущего инструмента.

Поэтому сложнопрофильный инструмент (сверла, зенкеры, развертки, концевые и зуборезные фрезы, протяжки и т.д.) производят почти исключительно из быстрорежущей стали [1]. В связи свыше изложенным материалом в настоящей работе рассматривается проблема повышения долговечности сложнопрофильного режущего инструмента из быстрорежущей стали, твердого сплава.

Анализ основных направлений совершенствования режущего инструмента позволяет отметить, что главные тенденции такого совершенствования, связанны с ростом твердости, теплостойкости, износостойкости при некотором снижении прочностных характеристик, вязкости и трещиностойкости [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]

Решение проблемы создания инструментального материала с «идеальными» свойствами должно быть связано с разработкой композиционного инструментального материала, у которого высокие значения поверхностной твердости, теплостойкости, физико-химической

инертности сочеталось бы с достаточными значениями прочности при изгибе, ударной вязкости, предела выносливости.

В последние годы, как за рубежом, так и в странах СНГ имели место значительные изменения в производимых марках режущего инструмента, такая тенденция связана как с повышением требований к режущему инструменту, так и с совершенствованием методов термической обработки и технологии производства.

1.2 Классификация методов нанесения износостойких покрытий в зависимости от условий их применения

В мировой практике все большее применение находят методы повышения долговечности инструмента путем нанесения износостойких покрытий. Режущий инструмент с покрытием обладает высокой производительностью, высокой износостойкостью в сочетании с достаточно удовлетворительной прочностью при изгибе, ударной вязкостью, выносливостью, трещиностойкостью, универсальностью, экономичностью. Появляется возможность управления условиями формирования и свойствами покрытий, а также свойствами композиции покрытие — инструментальный материал. Инструментальный материал с износостойким покрытием является новым материалом композиционного типа, в котором оптимально сочетаются свойства поверхностного слоя (высокие значения твердости, теплостойкости, пассивности по отношению к обрабатываемому материалу и т. д.) и свойства, проявляющиеся в объеме тела инструмента (прочность, ударная вязкость, трещиностойкость и т. д.).

Таким образом, инструментальные материалы с износостойким покрытием по своим свойствам приближаются к свойствам идеализированного инструментального материала, а инструмент, изготовленный из такого материала, обладает удовлетворительным запасом жесткости и прочности одновременно, что увеличивает его долговечность,

особенно при использовании на сложном автоматизированном оборудовании.

Среди многообразия различных методов осаждения покрытий, наносимых на режущий инструмент, наибольшее распространение получили одно– и многослойные покрытия. При нанесении покрытия происходят сложные физические и химические процессы, и, выбор состава покрытия зависит от условий обработки [1].

Проведен сравнительный анализ способов формирования качества поверхностного слоя при полном и локальном нанесении износостойких покрытий на режущий инструмент [7, 8, 19].

Каждый метод нанесения покрытий обладает преимуществом и недостатками, имеет специфическую область применения, которая зависит от технологических особенностей метода, степени автоматизации, экономических затрат на процесс нанесения покрытия.

1.2.1 Метод химического осаждения покрытий

Этот метод основан на гетерогенных химических реакциях в парогазовой среде, окружающий инструмент, в результате которых образуются покрытия. Исходными продуктами служат газообразные галогениды, при взаимодействии которых с другими составляющими смесей (водородом, аммиаком, окисью углерода) образуется покрытие. Разложение галогенида происходит вследствие термической химической реакции при температуре 1000-1100°С [1].

Покрытие формируется адсорбцией, с последующей диффузией, углерода в титановое покрытие или хемосорбцией с образованием тугоплавкого соединения. Наиболее вероятен интегральный механизм формирования покрытия, включающий оба процесса – хемосорбцию с осаждением соединения и адсорбцию с последующей диффузией.

Метод химического осаждения покрытий из парогазовой фазы (CVD) широко используется при массовом производстве (5÷10тыс.) твердосплавных

пластин и цельно твердосплавного инструмента. Этот метод имеет подгруппы: газотермический метод (ГТ), лицензионные технологии шведской фирмы «Сандвик Коромант» (технология GM) и австрийской фирмы «Планзее» (технология GC), методы термодиффузионного насыщения (ТДН), к которым относится метод диффузионная термообработка (метод ДТ) [1, 2].

В основе метода лежат высокотемпературные гетерофазные реакции, в основе которых используют галогениды металлов, газовостановитель (H_2) и реакционные газы. На свойства и параметры покрытия (микротвердость, толщина, фазовый состав, структуру) оказывают влияние реагенты парогазовой смеси, давление смеси и скорость подачи.

Недостатки этого метода заключаются в следующем:

1. выделение активных реагентов приводит к охрупчиванию покрытия, снижению адгезии с твердым сплавом, изменению физико-механических свойств и теплофизических свойств;

2. упрочненный режущий инструмент методом химического осаждения покрытий не используют в следующих технологических операциях резания:

- резание труднообрабатываемых материалов;
- черновое фрезерование;
- нарезание широкоходной резьбы для газовых труб.

1.2.2 Метод физического осаждения покрытий

Методы физического осаждения покрытия (PVD) основаны на испарении вещества в вакуумное пространство камеры с подачей реакционного газа (азот, кислород, метан и др.). Различие методов физического осаждения покрытия состоит в принципах физического испарения вещества, различной степени ионизации пароионного потока, конструктивных особенностях установок. Среди методов физического осаждения покрытия наибольшее распространение получили: конденсация вещества из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой

(технология КИБ) и его разновидность «Ion Bond» - США (технология КИБ); магнитронно-ионное распыление (метод МИР), используемое фирмой «Бальцерс» - Швейцария и его разновидность МИРР (Россия); ионное плакирование и его разновидность (метод ARE), разработанный в Калифорнийском университете США.

Все эти технологии универсальны, поскольку можно варьировать температурой в зонах нанесения покрытий [1, 2].

Значительный вклад в развитие универсальных (физических) методов получения покрытий на рабочих поверхностях режущего инструмента внесли отечественные разработчики: Л.С. Саблев, И.И. Аксенов, А.А. Андреев, В.Г. Падалка (ФТИ АН УР), А.К. Синельщиков, В.П. Жедь (ВНИИ), А.И.Григоров (НИИТАВТОПРОМ), И.П. Третьяков, А.С. Верещака, С.В. Касьянов С.Н. Григорьев (МГТУ «Станкин»), Ю.Н. Внуков (Укрниистецсталь), Ю.Г. Кабалдин (Комсомольск-на-Амуре, Технический университет).

Покрытие можно рассматривать как некоторую промежуточную технологическую среду между инструментальным и обрабатываемым материалами, с помощью которой можно достаточно эффективно управлять свойствами основы: твердость, теплостойкость, трещиностойкость, физико-химическая пассивность по отношению к обрабатываемому материалу. Функциональными параметрами процесса резания: уровень деформирования срезаемого слоя, силы резания, температуры, термомеханические напряжения и т.д. и интенсивностью изнашивания инструмента [6].

Как показано в работах [7, 8, 19, 21, 22, 23, 24] наиболее эффективно свойствам режущего инструмента с покрытием, можно управлять за счет варьирования химическим составом покрытия, его структурой и типом связи с инструментальным материалом. В свою очередь, указанные параметры будут сильно зависеть от метода нанесения покрытия и технологических условий формирования исходных свойств. В частности, влияние на структуру и дефектность покрытия, тип связи с инструментальной матрицей

может оказать субструктура, загрязненность и дефекты приповерхностных слоев [1, 2, 9, 22, 25, 26].

Синтез покрытий осуществляется за счет электродугового испарителя, т.е. из плазмы электродугового разряда. Системы вакуумно-дугового испарения применяют на любое основание (инструментальный материал), включая, полутеплостойкие штамповые стали и керамику, т.к. в процессе синтеза температурные данные могут варьироваться в очень широких пределах (100 ÷ 1000°С).

Преимущества метода физического осаждения покрытия:

1. метод позволяет синтезировать покрытия на основе одинарных, двойных, тройных систем нитридов, карбидов, боридов, силицидов и их смесей: (Ti, Cr)N; (Ti, Nb, Cr)N, (Ti, Nb, Cr)C;

2. метод позволяет получать многослойные покрытия, имеющие более сбалансированное соотношение таких важнейших характеристик, как вязкость, твердость; более устойчивых к разрушению при приложении циклических нагрузок; более высокую трещиностойкостью;

3. метод позволяет, имеет высокую производительность процесса и малую длительность синтеза покрытий относительно химического осаждения покрытия (CVD).

Однако метод физического осаждения покрытия имеет недостатки, такие как:

- в процессе испарения металла (особенно с низким атомным весом – Ti, Al), образуется капельная фаза из материала катода, которая осаждается на поверхность покрытия и снижает его качество;

- в процессе конденсации покрытия, как на кромках, так и на поверхности режущего инструмента, возникают микродуги, приводящие к эрозии (электроэрозии), а острые режущие кромки могут скруглиться, т.е. произойти процесс охрупчивания.

1.2.3 Ионная имплантация

Среди эффективных методов улучшения физических, механических и химических свойств поверхностного слоя одно из лидирующих мест занимает ионная имплантация, представляющая собой ионно-вакуумную технологию [2].

Сущность метода ионной имплантации состоит в бомбардировке поверхности инструментального материала ионами, имеющими энергию около 5 – 40кВ, в результате которой происходит внедрение ионов и атомов легирующего элемента. Эффект упрочнения достигается как за счет роста плотности дефектов кристаллического строения инструментального материала, закрепления этих дефектов атомами легирующих элементов, так и за счет формирования дополнительного количества мелкодисперсных карбидных, нитридных и интерметаллических структур. Следует отметить, что технология ионной имплантации является наиболее перспективной с точки зрения создания композиционных материалов с оптимальным набором поверхностных свойств.

Внедрение элементов, таких как N_2 и C, влияет на механические свойства поверхности. При этом искажается кристаллическая решетка и повышается твердость. Границы зерен оксидов и границы дислокационных блоков представляют собой каналы быстрой диффузии для имплантированных атомов. Ионная имплантация – когда в материале одновременно идет окисление и появляются напряжения. В результате наблюдается следующие эффекты упрочнения:

1. Внедрение, на глубину до 700нм бомбардируемых ионов, в результате чего образуется мелкодисперсное упрочнение фазы (нитридная, карбидная, карбонитридная и т.д.);

2. в результате мгновенного разогрева и охлаждения происходит микрозакалка, с образованием типичных закалочных структур;

3. происходит диссоциация основных элементов, входящих в состав воздуха, их мгновенная ионизация с последующим насыщением поверхности

ионами, повышенной подвижности (N^+, O^+, C^+). В результате происходит повышение твердости на 30 – 40% и износостойкости;

4. возможность получения практически любой комбинации «носитель – легирующий элемент, или легирующие элементы»;

5. простота управления ионным пучком и возможность обработки локальных участков поверхности;

6. отсутствие коробления деталей даже малой жесткости.

Своеобразен механизм изнашивания режущего инструмента из быстрорежущей стали.

Изнашивание упрочненного слоя глубиной до 700нм наступает быстро, уже на стадии приработанного изнашивания.

Ионная имплантация позволяет увеличить стойкость инструмента в 1,5 - 4 раза без увеличения радиуса скругления режущих кромок, что чрезвычайно важно для чистовых операций обработки резанием.

Технико-экономическая оценка этого эффекта в зависимости от режима обработки показала, что имплантация наиболее целесообразна при чистовых режимах.

Недостатком метода ионной имплантации является сложность и громоздкость оборудования.

1.2.4 Лазерное термоупрочнение

В настоящее время применяют достаточно много локальных термических методов упрочнения поверхности - газотермический, газопламенный, светолучевой, электродуговой, плазменный, индукционный, которые позволяют повысить прочность, твердость и износостойкость поверхностного слоя и в целом стойкость режущего инструмента. Каждая из технологий локального термического упрочнения имеет свои преимущества и недостатки, которые определяют эффективные технико-экономические области ее применения [27, 28].

Химическое осаждение позволяет получать на подложке локальную металлизацию сложных очертаний с малыми размерами, исчисляемыми несколькими микрометрами.

По сравнению с перечисленными локальными методами лазерное термоупрочнение режущего инструмента отличается следующими существенными преимуществами:

- более высокая степень локальности обработки и прецизионности в дозированном вложении энергии в упрочняемую деталь при термической обработке позволяет сохранить геометрические размеры упрочняемого режущего инструмента в микронном поле допуска и избежать последующей механической обработки;

- высокие скорости нагрева и охлаждения (~10^3 - 10^5°C/c) обеспечивают более высокую твердость и износостойкость поверхностного слоя;

- термическая обработка без оплавления поверхности может применяться как финишная операция и после нее не требуется последующая механическая доводка - шлифование;

- процесс лазерного упрочнения достаточно легко поддается автоматизации [27, 28].

Среди вышеперечисленных методов лазерное упрочнение обеспечивает наибольшее повышение износостойкости. Упрочнение поверхности при лазерной обработке основано на эффекте автозакалки, т. е. быстрого нагрева и охлаждения поверхностного слоя. Лазерное термоупрочнение поверхностного слоя может осуществляться непрерывным или импульсным излучением на двух режимах: без оплавления или с оплавлением поверхностного слоя. Импульсное лазерное упрочнение позволяет получить более высокое приращение твердости поверхностного слоя, но меньшую глубину [28].

Лазерная обработка поверхности металлов и сплавов относится к локальным методам термической обработки с помощью высококонцентрированных источников нагрева. В этой связи лазерный луч

как источник нагрева при термической обработке материалов имеет черты, свойственные всем другим высококонцентрированным источникам, а также и свои перечисленные ниже особенности и преимущества.

1. Высокая концентрация подводимой энергии и локальность позволяют производить обработку только поверхностного участка материала, без нагрева остального объема и нарушения его структуры и свойств, что приводит к минимальному короблению. В результате очевидны экономические и технологические преимущества. Кроме того, высокая концентрация подводимой энергии позволяет провести нагрев и охлаждение обрабатываемого объема материала с большими скоростями при очень малом времени воздействия. В результате получаются уникальные структуры и свойства обработанной поверхности.

2. Возможность регулирования параметров лазерной обработки в широком интервале режимов позволяет разработать обширный ряд методов поверхностной лазерной обработки, причем в каждом методе можно легко регулировать структуру поверхностного слоя, его свойства, такие как твердость, износостойкость, шероховатость, а также геометрические размеры обработанных участков и др.

3. Отсутствие механических усилий на обрабатываемый материал дает возможность обрабатывать хрупкие конструкции.

4. Возможность обработки на воздухе, легкость автоматизации процессов, отсутствие вредных отходов при обработке и т.д. определяют высокую технологичность лазерного луча.

5. Возможность транспортировки излучения на значительные расстояния и подвода его с помощью специальных оптических систем в труднодоступные места позволяет производить обработку в тех случаях, когда другие, в том числе и с помощью высококонцентрированных источников нагрева, применить невозможно.

Одним из перспективных способов повышения стойкости режущего инструмента для металлообработки является импульсное лазерное упрочнение

рабочих кромок. Лазерное упрочнение (закалка) позволяет существенно повысить микротвердость, теплостойкость, изностойкость поверхностного слоя режущей кромки инструмента, что является хорошей предпосылкой повышения стойкости инструмента [28].

Несмотря на примеры успешного применения процесса термоупрочнения импульсными лазерами этот метод имеет ряд недостатков.

1. низкая производительность, обусловленная малой частотой следования импульсов современных лазерных установок и малыми размерами лазерного пятна;

2. малая глубина упрочнения из-за ограниченной длительности импульса;

3. неравномерность свойств поверхности, обусловленная неравномерной плотностью энергии в пятне, а также «чешуйчатостью» строения поверхности, наличием зон отпуска, что в ряде случаев не позволяет получить хорошие эксплуатационные свойства.

Применение импульсного лазерного излучения для упрочнения режущего инструмента из быстрорежущей стали.

Существенный недостаток метода – нарушение исходной шероховатости поверхностного слоя требует проведения дополнительной финишной механической обработки.

1.2.5 Электроискровое упрочнение.

Упрочнение резьбового инструмента осуществляют методом нанесения износостойкого покрытия в виде электроискрового легирования на режущую поверхность инструмента. Инструмент для нарезания резьбы устанавливают в специальную оснастку, изготовленную из высокотемпературных материалов. Покрытие наносят на всю длину передней режущей поверхности в виде полосы шириной H=(2,0-2,5)h от линии вершин резьбового профиля, где h - высота резьбового профиля, и толщиной слоя 35-70 мкм при

обеспечении повышенного отвода тепла от вершин резьбовых режущих профилей. В результате уменьшаются материальные и энергетические затраты на изготовление, и повышается срок службы резьбонарезных инструментов [1, 2].

Сущность метода заключается в следующем:

1. происходит насыщение поверхности легирующими элементами или их соединениями приповерхностных слоев инструментального материала на глубину до 0,5мм, в результате чего происходит повышение твердости быстрорежущей стали, снижается склонность к физико-химическому взаимодействию с обрабатываемым материалом и таким образом повышается износостойкость инструментального [21];

2. Вследствие очень короткого времени нагрева локальных слоев инструментального материала и их мгновенного охлаждения происходит своеобразная закалка приповерхностных слоев, в результате которых происходит повышение твердости и износостойкости инструментального материала.

Преимущество заключается в том, что нанесение износостойкого покрытия в виде полосы на переднюю режущую поверхность в 2-3 раза сокращает площадь покрытия, образуя сплошной слой покрытия и минимальные остаточные внутренние напряжения.

Принцип метода заключается в воздействии на рабочую поверхность инструмента индентором, который состоит из твердых сплавов группы ВК (ВК3, ВК4) или тугоплавких металлов 4 - 6 групп (Ti, V, Cr, W).

В результате электроискровых разрядов происходит насыщение (легирование) поверхности инструментального материала, элементами из катода, повышающими твердость и износостойкость инструментального материала. Эффективность процесса определяется оптимальным сочетанием таких параметров, как:

$T = f(V_э, F, I_р, U_р)$,

где $V_э$ – скорость перемещения индентора; F – частота вибрации катода; $I_р$ – ток разряда; $U_р$ – напряжение разряда.

Одним из преимуществ электроискрового метода обработки материалов является то, что при определённых условиях резко повышается прочностные свойства поверхности заготовки: твёрдость, износостойкость, жаростойкость и эрозионная стойкость. Эту особенность используют для повышения износостойкости режущего инструмента, штампов, пресс-форм и деталей машин, упрочняя металлические поверхности электроискровым способом.

При электроискровом упрочнении применяют обратную полярность (заготовка – катод, инструмент – анод), обработку производят в воздушной среде и, как правило, с вибрацией электрода. Основные преимущества электроискрового способа нанесения покрытия заключается в следующем: покрытия имеют большую прочность сцепления с материалом основы; покрываемые поверхности не требуют предварительной подготовки; возможно нанесение не только металлов и их сплавов, но и их композиций; на ограниченных участках обрабатываемой поверхности, возможно, проводить сложнейшие микро металлургические процессы.

Процессы, происходящие при электроискровом упрочнении, сложны и являются предметом тщательных исследований. Сущность упрочнения состоит в том, что при электроискровом разряде в воздушной среде происходит полярный перенос материала электрода на заготовку. Перенесённый материал электрода легирует металл заготовки и, химически соединяясь с диссоциированным атомарным азотом воздуха, углеродом и материалом заготовки, образует диффузионный износоустойчивый упрочненный слой. При этом в слое возникают сложные химические соединения, нитриды и карбонитриды и формируется закалочная структура.

При электроискровом упрочнении микротвердость может быть доведена до 230МПа, высота микронеровностей обработанной поверхности до R_a = 2,5мкм. Толщина слоя покрытия составляет 0,003 - 0,2мм.

После упрочнения инструмента рекомендуется выглаживать его поверхность алмазными кругами, шлифовальной шкуркой или доводить поверхность электродом из электрографита.

Все вышеперечисленные методы применяют для получения однородной структуры покрытий, улучшающей физико-механические и теплофизические свойства режущего инструмента в процессе обработки. Покрытие может заметно улучшить свойства инструментального материала с точки зрения повышения его сопротивляемости микро - и макроразрушению с одной стороны, однако с другой стороны, покрытие может способствовать уменьшению контактных нагрузок, снижению мощности тепловых источников и благоприятному перераспределению теплопотоков, тем самым уменьшая термомеханическую напряженность режущей части инструмента. Таким образом, покрытие можно рассматривать как своеобразную промежуточную технологическую среду между контактирующими поверхностями инструментального и обрабатываемого материалов с уникальной способностью одновременно повышать сопротивляемость контактных площадок инструмента разрушению и снижать термомеханическую нагрузку, приводящую к такому разрушению.

В результате анализа особенностей промышленной эксплуатации режущего инструмента с покрытием можно отметить следующее.

Во-первых, инструмент с покрытием заметно дороже инструмента без покрытия, что требует более высокой культуры производства, использования неизношенного станочного оборудования, тщательного экономического анализа целесообразности использования инструмента с покрытием.

Во-вторых, наиболее целесообразно эксплуатировать инструмент с покрытием на скорости, превышающей скорость резания обычного инструмента на 30 ÷ 60%. Такие скорости соответствуют оптимальной экономической скорости резания, минимизирующей интенсивность изнашивания и затраты на обработку резанием.

В-третьих, в настоящее время промышленность использует разнообразный режущий инструмент с покрытием, получаемый различными технологическими методами, что требует от заводских технологов знаний областей наиболее рационального использования такого инструмента.

Эффективность инструмента с покрытием при различных условиях обработки сильно зависит от метода получения покрытия даже одного химического состава [27].

1.3 Применение износостойких покрытий

Покрытия в машиностроении имеют широкое развитие, однако покрытия методом физического осаждения покрытия и химического осаждения покрытия чаще всего используются для упрочнения всего спектра номенклатуры режущего инструмента, поскольку имеют высокую твердость и низкий коэффициент трения.

Например, для защиты от окисления тугоплавкие металлы могут быть покрыты жаростойкими сплавами типа Hf - Ta или Nb - Ti - Al - Cr, которые обладают высокой трещиностойкостью и стойкостью к ударным нагрузкам. Если для защиты материалов с малым содержанием углерода использовать танталсодержащие покрытия, то на границе выделится TaC, ухудшающий адгезию покрытия.

Покрытия, нанесенные методом плазменного осаждения, используют для штамповочного инструмента. Для повышения стойкости материалов в условиях абразивного и адгезионного износа, а также износа при ударной нагрузке использовали физическое осаждение покрытия.

Буровой инструмент упрочняют методом химического осаждения покрытия, чтобы обеспечить работоспособность в условиях истирания и коррозии при высоких температурах (свыше 1100°C).

В то же время покрытия имеют значительную хрупкость, снижающие эксплуатационные свойства. В связи с этим может быть использована комбинированная обработка, а на сегодняшний день такая модификация практически себя исчерпала.

Кроме износостойких покрытий есть теплозащитные покрытия, которые также широко применяются в промышленности.

Теплозащитные покрытия должны обладать высокой эрозионной и коррозионной стойкостью для предотвращения перегрева, поэтому их применяют для двигателей. Как правило, используют оксидное покрытие, толщина которого не должна превышать 1мкм. Кроме двигателей упрочняют камеры сгорания газовых турбин и выхлопные трубы. Для упрочнения кромок вырубных пуансонов из сталей У8 и У10 используют метод термоупрочнения импульсными лазерами. Например, для упрочнения пуансонов на боковую поверхность наносится несколько рядов пятен с перекрытием при $К_п$ = 0,5. Такая схема упрочнения позволяет сохранить упрочненный слой после переточек. Стойкость пуансонов увеличивается в 2÷5 раз. В отличие от пуансонов матрицы в большинстве случаев упрочняют с лицевой поверхности, поэтому после их переточки необходимо повторное упрочнение.

Несмотря на примеры успешного применения процесса термоупрочнения импульсными лазерами этот метод имеет ряд недостатков:

1. низкую производительность, обусловленную малой частотой следования импульсов современных лазерных установок и малыми размерами лазерного пятна;

2. малую глубину упрочнения из-за ограниченной длительности импульса;

3. неравномерность свойств поверхности, обусловленная неравномерной плотностью энергии в пятне, а также «чешуйчатостью» строения поверхности, наличием зон отпуска, что в ряде случаев не позволяет получить хорошие эксплуатационные свойства.

Целесообразно применять локальное упрочнение трущихся поверхностей в тех случаях, когда применение других традиционных методов упрочнения невозможно, например, из-за большого коробления детали или из-за трудности подвода теплоты и т.д.

Указанное многообразие факторов, влияющих на покрытие, зависит от соотношения физико-химических свойств обрабатываемого материала и покрытия. При низких и средних температурах это определяет адгезионную

прочность, при высоких — характер и интенсивность твердофазных и жидкофазных диффузионных реакций, контактно-реактивное плавление.

Весьма актуально установление функциональных связей между технологическими параметрами процесса формирования износостойкого покрытия и изнашиванием инструмента. Эти задачи до настоящего времени не решены из-за сравнительно низкой долговечности покрытия.

Для повышения долговечности режущего инструмента с покрытием, необходим новый метод нанесения покрытия, способствующий увеличению запаса прочности и жесткости, снижению склонности режущей части инструмента к потере формоустойчивости и термопластическим прогибам при приложении термомеханических напряжений, возникающих в процессе резания. Необходим новый тип покрытия, с добавками, в виде пластичного материала, имеющего низкий модуль упругости и сдвига, для релаксации напряжений. Таким образом, выявление и установление закономерностей связывающих технологические параметры нанесения функциональных покрытий с износостойкостью и долговечностью инструментов, разработка и всестороннее исследование новых методов формирования диффузионных покрытий, обеспечивающих высокие режущие свойства, релаксацию термомеханических напряжений, торможение поверхностного растрескивания являются весьма актуальной.

1.4 Кинетика и механизм изнашивания режущего инструмента с износостойким покрытием

Анализ кинетики изнашивания режущего инструмента с покрытием, получаемым методом конденсации вещества из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой, показал, что, несмотря на значительный вклад покрытия в снижение интенсивности изнашивания контактных площадок и повышение стойкости режущего инструмента, их эффективность заметно ниже ожидаемой [1, 2]. В частности в работе [8] показано, что долговечность покрытий по технологии конденсация вещества из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой (PVD) и (CVD) на контактных площадках

инструмента из быстрорежущей стали составляет 0,5-5% от периода стойкости инструмента.

Краткий анализ тенденций совершенствования режущего инструмента традиционными методами позволяет утвердить, что методы такого совершенствования в значительной степени уже исчерпаны, особенно в связи с невозможностью сбалансированного создания свойств, связанных с твердостью, теплостойкостью и с износостойкостью с одной стороны и вязкостью и прочностью - с другой.

Эффективным направлением создания режущего инструмента является поверхностное упрочнение.

По данным работ [4, 7, 8, 9, 29] такая ситуация типична для многих типов инструмента (сверла, метчики, протяжки, быстрорежущие пластины и т.д.). Начальные акты разрушения покрытий наблюдаются уже в период приработочного изнашивания инструмента, а интенсивность разрушения покрытия увеличивается с ростом термомеханических нагрузок.

Среди многих причин разрушения покрытия на контактных площадках инструмента: микроползучесть локальных объемов инструментального материала и склонность режущей части инструмента к упругим прогибам и потере формоустойчивости. Последнее обусловлено ростом нормальных контактных напряжений по передней поверхности σ_γ, при некотором снижении касательных напряжений τ_γ и постоянных значениях напряжений σ_α и τ_α действующих на контактной площадке задней поверхности. Кроме того, для инструмента с покрытием отмечена тенденция смещения эпюры максимальных напряжений к режущей кромке, что свидетельствует о тенденциях режущего инструмента с покрытием к снижению пластической (вязкой) прочности [12].

Действительно, согласно выражению:

$$n_т = \frac{\sigma_т}{\sqrt{3(C_1\sigma_\gamma + \tau_\alpha)^2 + \sigma_\alpha^2}}$$

где $n_т$ – запас пластической прочности инструмента; $\sigma_т$ – предел текучести инструментального материала; C_1 – коэффициент, определяемый

экспериментально ($C_1 \leq 1$), увеличение нормального напряжения σ_γ при неизменных значениях напряжений τ_α, σ_α приводит к уменьшению запаса пластической прочности режущего инструмента.

Еще одной причиной преждевременного разрушения покрытия на контактных площадках режущего инструмента является возникновение критических напряжений на границе раздела «покрытие – основа» при термомеханическом нагружении контактных площадок инструмента. Эти напряжения сильно зависят от разницы теплофизических и физико-механических свойств материалов износостойкого покрытия и инструмента, собственных микронапряжений инструментального материала после полной термообработки и заточки режущего инструмента.

Для эффективной работы режущего инструмента с покрытием необходимо устранение или уменьшение причин, приводящих к преждевременному разрушению покрытия.

Значительный вклад в изучение механизма изнашивания режущего инструмента с покрытием в зависимости от условий его получений внесены работами [5, 7, 22, 23, 30]. В частности было показано, что в процессе приработочного изнашивания режущего инструмента покрытие заметно снижает термомеханическую нагрузку на контактные площадки инструмента [6, 9, 15]. В результате происходит своеобразное упрочнение слоев непосредственно примыкающих к покрытию и благоприятная с позиций лучшего сопротивления изнашиванию перестройка структуры. После частичного или полного разрушения покрытия обрабатываемый материал непосредственно вступает в контакт с инструментальным материалом. Интенсивность изнашивания последнего существенно снижается.

Ю.Н. Внуков [30] также рассмотрел особенности механизма изнашивания быстрорежущего инструмента с износостойким покрытием при непрерывном резании конструкционных сталей со средними и большими толщинами среза:

1. При начальном контакте стружки с передней поверхностью для инструмента с покрытием, уменьшается длина контакта стружки с передней поверхностью C_γ, увеличивается угол сдвига ϕ, и, в связи с этим, снижается коэффициент продольной деформации стружки ξ и сила стружкообразования R. Однако среднее контактное давление σ_γ увеличивается, т.к. сокращение площади контакта за счет уменьшения длины контакта происходит в большей степени, чем снижение нормальной составляющей силы $P_{N\gamma}$.

2. Через 0,5 - 2 мин работы инструмента происходит прорыв (разрушение) покрытия вместе начала формирования лунки и стружка начинает непосредственно контактировать с основой. Однако условия контактного трения в этом случае отличаются от условий контактирования стружки с инструментом без покрытия более высокими значениями средних контактных давлений σ_γ.

3. Увеличение нормальных нагрузок при трении ведет к повышению площади фактического контактирования в лунке, которая стремится к нормальной, а сила трения может достигать предельных величин. В этих условиях сдвиг в контактных слоях стружки выносится за вершины микронеровностей контактной поверхности инструмента на поверхность наименьшего сопротивления сдвигу материала стружки. Иными словами, при повышении среднего контактного давления наблюдается полное затормаживание контактного слоя стружки, а граница, определяющая ее движение, поднимается выше гребешков микронеровностей поверхности быстрорежущей стали, т.е. реализуется пластический сдвиг в материале стружки.

В случае упрочнения материала основы, получения при этом криволинейных форм контактирующих поверхностей (лунки), заторможенный слой, состоящий из множества упрочненных прослоек, может достигать значительных размеров и быть достаточно устойчивым.

4. Образовавшийся заторможенный слой у инструмента с покрытием плотно прилегает к задней стороне лунки. В этом случае реализуется внутреннее трение в материале сходящей стружки.

Таким образом, устойчивый заторможенный слой обрабатываемого материала, сформировавшийся у режущего инструмента с покрытием, предохраняет заднюю стенку лунки от контакта со сходящей стружкой и отодвигает источники тепловыделения от ее поверхности, что заметно увеличивает износостойкость и стойкость режущего инструмента.

Последнее резко снижает эффективность применения инструмента с покрытием, поэтому для повышения его работоспособности необходимо: повышение качества покрытия, применение смазочно-охлаждающей жидкости и комбинированных методов упрочнения с целью повышения качества покрытий.

Выявление особенности изнашивания инструмента с различными вариантами покрытий предопределяют области их эффективного использования при металлообработке .

Механизм формирования поверхностных слоев при упрочняющей обработке с нанесением покрытия связан с диффузией материала покрытия в поверхность. Основным фактором, характеризующим упрочняющий эффект, является силовой фактор, который оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние поверхности, а также на шероховатость.

Изменение поверхностных свойств инструментального и обрабатываемого материалов, и возможность их варьирования в достаточно широких пределах путем использования покрытий различного состава, строения и структуры, позволяют управлять важнейшими функциональными параметрами процесса резания. К таким параметрам можно отнести характеристики стружкообразования, контактных и тепловых процессов, изнашивания контактных площадок инструмента. Наконец, направленное изменение основных показателей процесса резания позволяет в достаточной

степени влиять и на такие параметры, как стойкость инструмента, производительность, долговечность, точность и качественные показатели готовых деталей.

При разработке режущего инструмента с износостойким покрытием весьма важно уяснить требования к покрытию, исходя из условий его разрушения на контактных площадках инструмента и роли в сложных процессах их изнашивания. Первое требование, которому должно удовлетворять покрытие — способность сопротивляться разрушению при напряжениях до 4000МПа. Второе требование - способность покрытия сохранять свои свойства при температуре 200 ÷ 1100^0C, т.е. температуре, возникающей в процессе резания. Одновременно необходимо учитывать разную зависимость свойств (модуль упругости коэффициенты Пуассона, линейного расширения, твердость и т. д.) покрытия и инструментального материала от температуры.

Непосредственными причинами изнашивания контактных площадок инструмента являются интегрально протекающие процессы абразивного, адгезионного, адгезионно-усталостного, коррозионно-окислительного, диффузионного изнашивания. Если сопротивление абразивному изнашиванию достаточно эффективно может быть повышено путем увеличения твердости контактных площадок, то адгезионно-усталостные и диффузионные виды изнашивания инструмента в значительной степени зависят от кристаллохимических структур инструментального и обрабатываемого материалов.

При выраженных адгезионных видах изнашивания инструмента, обычно протекающих при резании с малыми и средними скоростями резания (температура 350÷550°С), происходит отрыв или срез мельчайших частиц инструментального материала под действием сил адгезии. Интенсивность разрушения и возникновения «мостиков» адгезии весьма велика. Роль покрытия в этих условиях должна сводиться к уменьшению интенсивности схватывания контактных площадок инструмента с обрабатываемым

материалом, а само покрытие должно достаточно эффективно сопротивляться усталостному разрушению. Снижение интенсивности адгезионного изнашивания инструмента с покрытием может быть достигнуто путем увеличения отношения твердости композиции «покрытие и обрабатываемый материал» $HV_{п.и.м}/HV_{о.м}$ к отношению твердости композиции « инструментальный и обрабатываемый материал» $HV_{и.м}/HV_{о.м}$ и твердости композиции «покрытие и инструментальный материал» $HV_{п.и.м}/HV_{и.м}$.

По мере роста скорости резания в зоне обработки возникает температура, превышающая 600 ÷ 700°С, активизируются интердиффузионные процессы, приводящие к взаимному диффузионному растворению компонентов инструментального и обрабатываемого материалов. В результате интердиффузии происходят структурные превращения в локальных приповерхностных слоях инструментального материала, что, в свою очередь, приводит к их разупрочнению, охрупчиванию. Одновременно возрастают напряжения в плоскости сдвига, как следствие упрочнения объемов обрабатываемого материала, что приводит к разрушению разупрочненных структур инструментального материала. Поэтому у покрытия должна быть высокая сопротивляемость твердо - и жидкофазным диффузионным реакциям с обрабатываемым материалом. В этом случае роль покрытия должна сводиться к «барьерной» функции, что может быть достигнуто введением в состав покрытия элементов с малой диффузионной подвижностью при температуре, соответствующей температуре, возникающей в процессе резания.

Участки упругого (дискретного) контакта между контактирующими поверхностями инструментального и обрабатываемого материалов подвергаются воздействию активных реагентов из окружающей среды. В результате происходит интенсивное окисление и коррозия участков упругого контакта инструмента. Роль покрытия в этих условиях заключается в

повышении сопротивляемости инструментального материала высокотемпературной коррозии и окислению [30].

Исходя из концепции покрытия, как промежуточной технологической среды между инструментальным и обрабатываемым материалами, были сформулированы требования к износостойким покрытиям, наносимым на режущий инструмент. Эти требования определяются служебным назначением инструмента, необходимостью согласования свойств материалов покрытия и инструмента и подходом к композиции покрытие - инструментальный материал как единому композиционному телу. Кроме того, выбранный состав покрытия должен обеспечиваться соответствующими технологическими условиями получения и отвечать общему подходу к покрытию как материалу, работающему в условиях тяжелого нагружения [30].

Наиболее важной функцией покрытия при взаимодействии с обрабатываемым материалом является управление процессом резания и термомеханическим нагружением режущей части инструмента. Взаимодействие покрытия на контактной площадке передней поверхности со срезаемым слоем определяет характер протекающих контактных процессов и, в частности, такие характеристики, как длина контакта, контактные деформации, мощность теплового источника на передней поверхности, контактные напряжения, напряжения сдвига и т.д. Взаимодействие покрытия на контактной площадке задней поверхности с обрабатываемым материалом влияет на мощность теплового источника на задней поверхности, характер формирования приповерхностных слоев обрабатываемых деталей, упругое последствие и, таким образом, сильно влияет на качественно-точностные характеристики обрабатываемых деталей.

Указанное многообразие факторов, на которые влияет покрытие в большой степени, зависит от физико-химического сродства обрабатываемого материала и покрытия. При низких и средних температурах это сродство определяет прочность адгезии, при высоких - характер и интенсивность

твердофазных и жидкофазных диффузионных реакций, контактно-реактивное плавление.

При низких и средних скоростях резания происходит взаимодействие контактирующих поверхностей в условиях слабого изменения исходных свойств контактирующих материалов. При средних температурах и контактных напряжениях возникает адгезионное взаимодействие между покрытием и обрабатываемым материалом при их дискретном контакте, что позволяет внешней среде достаточно свободно проникать в зону контактирования. При высоких скоростях резания температура возрастает, увеличивается предел текучести контактных слоев обрабатываемого материала, устанавливается сплошной контакт, снижается скорость относительного скольжения, резко возрастает возможность химических реакций и диффузии между покрытием и обрабатываемым материалом. При таком характере взаимодействия покрытия и обрабатываемого материала высока вероятность одновременного действия адгезионного, адгезионно-усталостного, абразивного, коррозионно-окислительного, диффузионного видов изнашивания режущего инструмента.

Работоспособность инструмента с износостойкими покрытиями в значительной степени зависит от условий его эксплуатации и определяется такими критериями, как среднее значение времени резания (стойкость) $\bar{T}$ и коэффициент его вариации $\nu_т$. Поэтому в значительной степени определяются условия эксплуатации и, в частности, работоспособность инструмента, которая определяется средней стойкостью и коэффициентом его вариации:

$$\upsilon = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{T}}.$$

Обработка нержавеющих и жаропрочных сталей характеризуется следующими особенностями:

1. Высоким упрочнением материала в процессе деформации при резании. Повышенная упрочняемость жаропрочных и нержавеющих сталей и

сплавов объясняется особенностями строения их кристаллической решетки. Они имеют больше возможных направлений скольжения и поэтому являются более пластичными, чем стали феррито-перлитной группы. Вследствие этого при пластической деформации нержавеющих и жаропрочных сталей значения их предела прочности при растяжении могут возрастать до двух раз.

2. Малой теплопроводностью обрабатываемых материалов. Это приводит к уменьшению стока тепла в деталь и, как следствие, к увеличению количества тепла, которое переходит в резец, к концентрации тепла в зоне резания и повышению температуры резания. Теплопроводность нержавеющих и жаропрочных сталей в 5 - 6 раз ниже, чем у углеродистой стали 45 и в 3 - 4 раза ниже, чем у легированных. При точении жаропрочных сплавов даже незначительное изменение скорости резания приводит к значительному повышению температуры резания.

3. Способностью сохранять исходную прочность и твердость при повышенных температурах, что приводит к высоким удельным нагрузкам на контактные поверхности инструмента в процессе резания - до 6000-10000МПа.

4. Повышенная виброустойчивость движения резания, обусловлена высокой упрочняемостью нержавеющих и жаропрочных материалов при неравномерности протекания процесса их пластического деформирования.

Возникновение вибраций приводит к переменным силовым и тепловым нагрузкам на рабочие поверхности инструмента, следовательно, к микро- и макровыкрашиваниям режущих кромок.

Обработка резанием высокопрочных закаленных сталей характеризуется малой пластической деформацией при стружкообразовании вследствие очень высокого сопротивления деформированию этих сталей. При обработке этих материалов из-за высоких значений механических характеристик возникают большие значения сил резания и высокие температуры резания. Удельная

сила резания имеет такие же значения, как и при обработке нержавеющих и жаропрочных сталей.

Перечисленные особенности обработки высокопрочных, закаленных, нержавеющих и жаропрочных сталей определяют их низкую обрабатываемость резанием.

В.Н. Подураев характеризует обработку нержавеющих и жаропрочных сплавов следующим образом: «Малая теплопроводность этих материалов приводит к резкому снижению отвода тепла в стружку и обрабатываемую заготовку, а, следовательно, повышению температуры в зоне контакта режущей части инструмента и заготовки с активизацией процессов адгезии и диффузии». В результате этого значительно увеличивается износ инструмента и явления налипания (схватывания), вызывающие разрушение режущих кромок [31, 32]. Интенсификации этих процессов способствует повышенные механические характеристики обрабатываемого материала при высокой температуре, большая истирающая способность материалов, а также переменное воздействие этих факторов, обусловленное вибрациями.

Рассматривая особенности обрабатываемости резанием жаропрочных сплавов, В.А. Кривоухов отмечает, что низкая обрабатываемость жаропрочных сплавов, имеющих низкую теплопроводность, объясняется их способностью сохранять свои высокие механические свойства при повышенных температурах. Высокая контактная температура, развивающаяся на поверхности режущего инструмента при большом давлении, способствует «слипаемости» обрабатываемого материала и материала инструмента, что приводит к быстрому износу последнего [33].

Высокие контактные нагрузки на режущий инструмент и высокие температуры резания при точении труднообрабатываемых материалов, очевидно, будут способствовать деформации режущих пластин.

Аналогичные выводы делает Венкатеш В.С. Он пишет, что «образование лунок в твердосплавных резцах с покрытием, как видно, происходит вследствие пластической деформации. Пластическая деформация, в свою

очередь, вызывает выпучивание, в результате чего имеет место сильный износ задней режущей грани инструмента».

Исследовалось влияние пластической прочности твердых сплавов на их режущие свойства при точении жаропрочных труднообрабатываемых материалов. Было установлено, что сопротивляемость твердого сплава деформации оказывает существенное влияние на стойкость инструмента. В большинстве случаев пластины с меньшей величиной деформации имели большую стойкость. Исключение составляли пластины с наименьшей величиной деформации, у которых из-за недоимочной хрупкой прочности имелись выкрашивания и сколы.

О значительном влиянии деформации режущего клина на износ инструмента отмечалось в работе [33]. Авторы установили, что деформация режущей пластины в зависимости от условий нагружения режущей кромки заключается в опускании передней поверхности и вылущении задней или передней поверхностей, (см. рисунок 1.1).

Деформация больших участков режущей кромки, чаще всего наблюдается при точении высокопрочных сталей. Это приводит к искусственному увеличению фаски износа на задней поверхности и заметному сокращению стойкости инструмента. Поэтому одной из основных характеристик режущих свойств пластин из твердых сплавов может быть предел текучести при срезе или сжатии при высоких температурах.

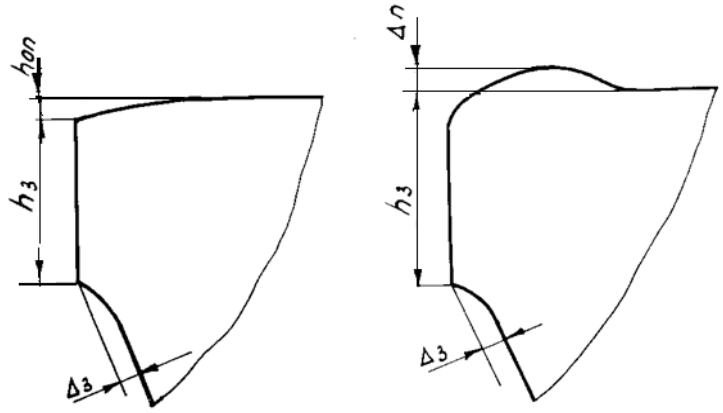


Рисунок 1.1 – Виды деформации режущего клина

Обширные исследования ползучести твердых сплавов в статических условиях при различных температурах проводил Креймер Г.С. Он определил зависимость скорости ползучести от температуры, зернистости сплавов, содержания кобальта в сплаве и т.п.

Анализ литературных данных показывает, что основными причинами выхода из строя твердосплавных пластин при обработке высокопрочных закаленных, нержавеющих и жаропрочных сталей с износостойкими покрытиями могут быть: разрушение покрытий в результате высоких контактных силовых и температурных нагрузок и деформация твердосплавной основы, приводящая к росту контактной площадки на задней поверхности инструмента.

Общим недостатком всех вышеперечисленных работ является то, что при описанных испытаниях одновременно протекают два процесса, определяющие стойкость инструмента: собственно износ твердого сплава и деформация режущего клина. Поэтому выделить деформацию в «чистом виде» и оценить ее влияние на работоспособность инструмента при обработке обычными твердыми сплавами не представляется возможным. С этой точки зрения «идеальным» является инструмент с покрытием. Покрытие, длительное время резания присутствующее на рабочих поверхностях инструмента, предохраняет твердосплавную основу от контакта с обрабатываемым материалом и от ее интенсивного износа. При этом износ самого покрытия практически не влияет на рост площадки контакта не задней грани.

На рисунке 1.2 показана классификация износа инструмента, предложенная фирмой Sandvik Coromant (Швеция).

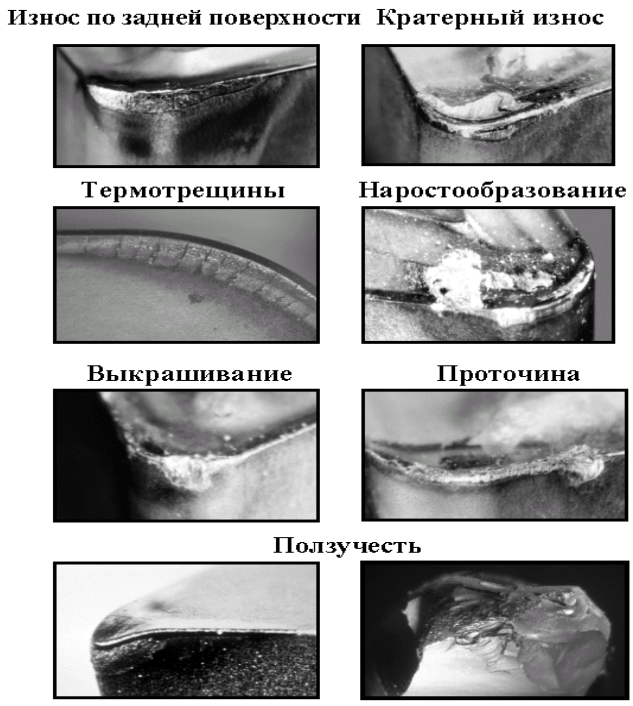


Рисунок 1.2 – Классификация износа инструмента

Ввиду разнообразия форм износа и деформирования режущей части инструмента, наблюдаемых визуально, оценить износ инструмента путем измерения его геометрических размеров является сложной задачей.

На рисунке 1.3 представлены визуально наблюдаемые признаки износа инструмента согласно классификации Г. И. Грановского [34, 35]. Мерой изношенности инструмента может служить линейный, а также массовый износ. Принимая за показатель линейный износ, об изношенности задней поверхности инструмента судят по максимальной ширине площадки износа $h_З$, а передней поверхности – по максимальной глубине лунки износа $h_л$. При чистовой размерной обработке изношенность инструмента удобно оценивать линейным размерным износом, характеризующим смещение вершины или переходного лезвия инструмента в направлении, перпендикулярном к обработанной поверхности, в результате износа его задних поверхностей.

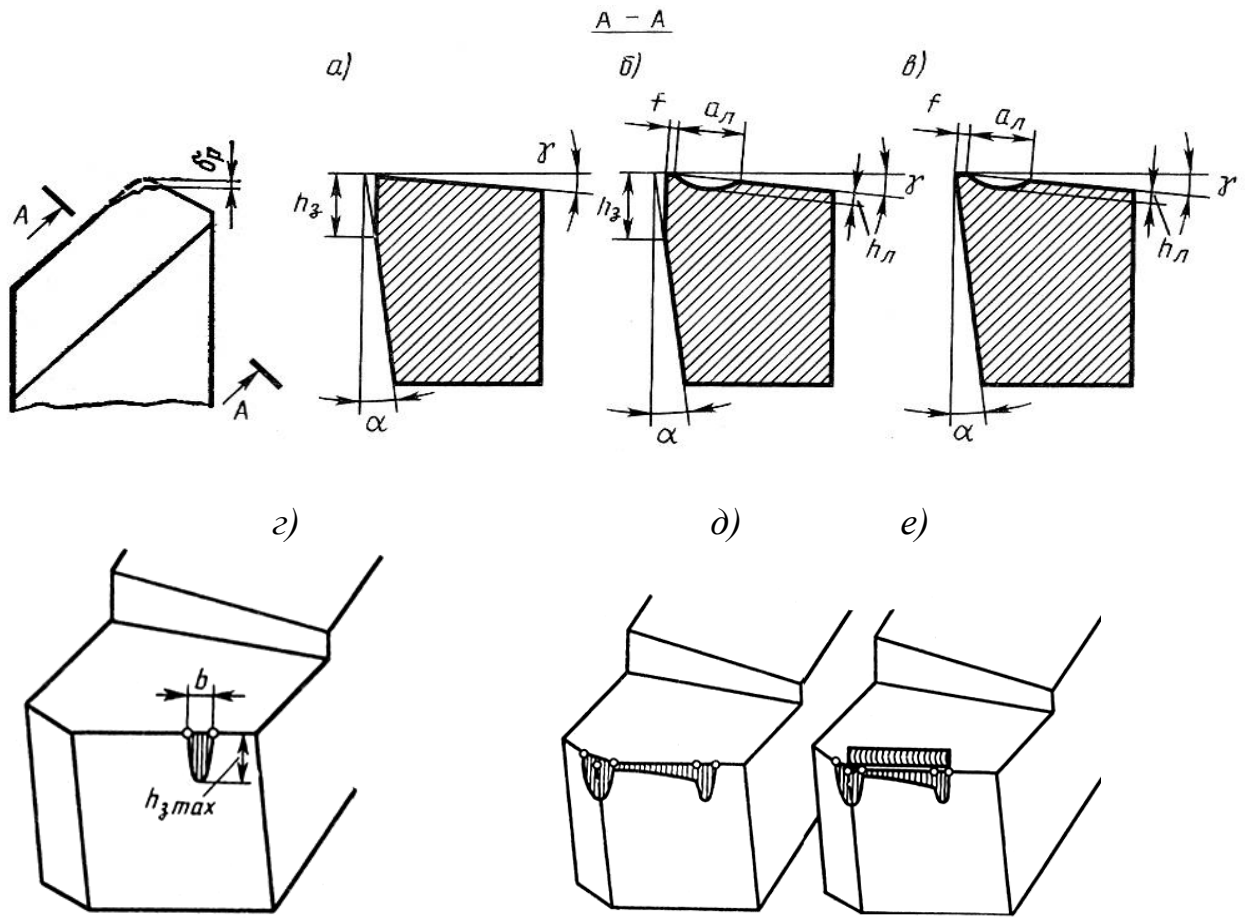


Рисунок 1.3 – Визуально наблюдаемые признаки износа режущих инструментов:

а) фаска износа на задней поверхности, б) фаска износа на задней поверхности и лунка на передней поверхности, в) лунка износа на передней поверхности, г) проточина, д) комбинированный износ по задней поверхности, е) все признаки износа отмечены одновременно

Стандарт ФРГ DIN в качестве основных характеристик износа предлагает ширину площадки износа по задней поверхности VB, глубину лунки КТ, расстояние КМ от середины лунки износа до режущей кромки (см. рисунок 1.4 а, б) [36].

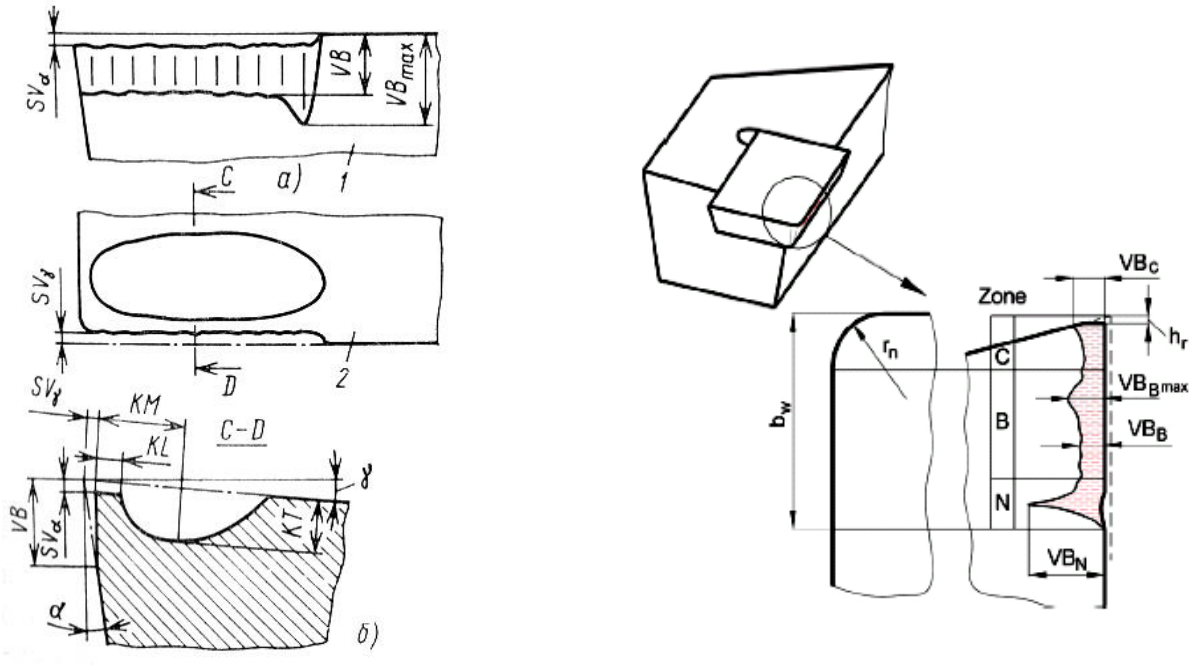


Рисунок 1.4 – Меры очагов износа режущего инструмента: а) износ по задней грани согласно DIN [34], б) лункообразный износ согласно DIN [34], в) износ по задней грани согласно стандарту ANSI/ASME B94.55 – 1985 [36]

Согласно американскому стандарту ANSI/ASME B94.55–1985 главная режущая кромка, с целью измерения параметров износа, разделяется на три зоны (см. рисунок 1.5 в): зона C – закругленная часть режущей кромки вершины резца, зона N – область изношенной режущей кромки длиной b_w, дальняя от вершины резца, зона B – оставшаяся прямая часть режущей кромки между зоной C и зоной N. Для твердосплавных резцов рекомендуются следующие критерии: средняя ширина фаски износа VB_B = 0,3мм, максимальная ширина фаски износа VB_{Bmax} = 0,6мм. Кроме того, в качестве критерия оценки износа при чистовом точении может использоваться шероховатость поверхности и длина проточины («уса») VB_N=1мм.

Максимальный линейный износ может быть достаточно надежной характеристикой при разработке промышленных норм допускаемых износов и норм расхода инструмента на переточки. Для исследования же физической природы износа инструментов более объективной характеристикой является

массовый износ – масса изношенной части инструмента в мг, которой пропорциональна работа сил трения, затрачиваемая на превращение инструментального материала в продукт изнашивания.

При использовании массовых мер стремятся учесть всю массу продуктов износа лезвия резца за период его работы. Проще рассчитать объем изношенной части резца по результатам обмера видимых признаков износа.

Тогда масса изношенных контактных площадок может быть определена по формуле:

$$m = \rho V ,$$

где ρ – плотность инструментального материала, V – объем изношенной части резца.

В качестве более универсального критерия изнашивания инструмента А. Д. Макаров [37, 38] предлагает использовать скорость размерного износа инструмента, которая определяет, насколько укорачивается вершина инструмента в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, за период нормального износа:

$$v_h = \frac{dh_r}{dT} = \frac{h_r - h_н}{T - T_н} = \frac{vsh_{оп}}{100} \text{ (мкм/мин)},$$

где h_r и $h_н$ – текущий и начальный радиальные износы, соответственно; T и $T_н$- общее и начальное время эксплуатации, соответственно; $h_{оп}$ – относительный поверхностный износ – величина радиального износа на 1000 см^2 обработанной поверхности:

$$h_{оп} = \frac{(h_r - h_н)100}{(l - l_н)s} \text{ (мкм/1000см}^2\text{)}$$

где $l_н$ – начальный обработанный участок заготовки; l – общая длина обработанной поверхности.

Тогда удельная стойкость инструмента, определяющая, какой участок поверхности обработан инструментом за 1мкм его радиального износа, рассчитывается по формуле:

$$T = \frac{d\Pi}{dh_r} = \frac{1}{h_{on}} = \frac{(l - l_н)s}{(h_r - h_н)100} \quad (10^3 см^2/мкм)$$

Относительный поверхностный износ и удельная стойкость инструмента являются универсальными характеристиками износа резца, так как они позволяют проводить сравнения разнообразных инструментальных материалов для различных сочетаний скоростей резания и подач.

А.Д. Макаров, А.С. Кондратов, В.С. Кушнер [37, 38, 39] и др. исследователи предлагают использовать дифференциальную характеристику износа инструмента – интенсивность изнашивания поверхностей инструмента, или относительный износ:

$$\delta_{Lз} = \frac{dh_з}{dL}, \delta_{Ln} = \frac{dh_n}{dL}.$$

Использование интенсивности изнашивания особенно необходимо в тех случаях, когда зависимости параметров износа от пути резания нелинейные и, следовательно, интенсивности изнашивания не постоянны в течение периода стойкости. Это можно наблюдать при обработке никелевых и титановых сплавов [33].

В.С. Кушнером показано [3, 4], что при постоянной геометрии инструмента и незначительном изменении режимов резания между интенсивностями изнашивания при фиксированной ширине фаски износа h_3 = 0,8мм и соответствующими расчетными температурами существует тесная связь, которая может быть аппроксимирована степенными функциями вида:

$$\frac{\delta_L - \delta_0}{\delta_1 - \delta_0} = \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0}\right)^m$$

где δ_L - интенсивность изнашивания инструмента на передней и задней поверхностях режущего лезвия, δ_1 - максимальная рациональная интенсивность изнашивания инструмента на передней и задней поверхностях режущего лезвия, δ_0 - минимальная интенсивность изнашивания инструмента на передней и задней поверхностях режущего лезвия, θ -

температуры поверхности инструмента, θ_0 *и* θ_1 - температуры, соответствующие значениям интенсивностей изнашивания δ_0 *и* δ_1, *m* – показатель степени.

В работах А. Д. Макарова и его школы использовалась модель И. В. Крагельского [40], выражающая связь интенсивности износа и механических свойств трущихся поверхностей при пластическом контакте в виде (Л. Ш. Шустер [41, 42]):

$$J_h \approx \left(\frac{\sigma_T + 2\tau_a}{\sigma_T - 2\tau_a} \right)^{t/2} / \left[\delta^t \, (HB)^{1+\frac{t+1}{2\nu}} \right]$$

Здесь интенсивность износа J_h вычисляется как толщина изношенного слоя, приходящаяся на единицу пути трения; $\sigma_т$ - предел текучести приконтаткных слоев изнашивающегося тела; τ_α - предел прочности адгезионных связей при срезе, обусловленный молекулярным взаимодействием в зонах фактического контакта (при заданной температуре); δ - относительное удлинение при разрыве; *HB* – твердость; *t* - показатель кривой усталости; *v* - показатель, зависящий от геометрических характеристик контакта.

Относительно существования минимума зависимости $\delta_L(\theta)$ и объяснения причин возрастания интенсивности изнашивания при уменьшении температуры нет единой точки зрения. Так, наряду с данными о резко выраженном минимуме, характерном для обработки никелевых и титановых сплавов [43] имеются данные авторов Такеяма и Мурата о весьма незначительном изменении интенсивности изнашивания при уменьшении температуры [44] при обработке жаропрочного сплава твердым сплавом Р10.

А. Д. Макаровым сформулирована получившая широкую известность и вызвавшая множество споров гипотеза о том, что минимум интенсивностей изнашивания инструмента соответствует постоянной (оптимальной) температуре резания [37].

Однако имеются экспериментальные данные [3], свидетельствующие об изменении «оптимальной» температуры при существенном изменении формы режущего лезвия и режимов резания. Они впрочем, не противоречат и

экспериментальным данным Макарова и его правилу, которое хоть и не совсем точно сформулировано, но отражает справедливое утверждение, что при различных комбинациях скорости резания, подачи и глубины резания может быть найдена постоянная температура в зоне резания (оптимальная температура), соответствующая оптимальным скоростям резания. Но говорить только о температуре, при анализе интенсивности износа, не правомерно, поскольку изнашивание вызывают также и силы резания. Проблемой является как определение оптимальной температуры, так и нахождение этих комбинаций режимов резания, которые определяют силы резания. Кроме того, с практической точки зрения не выгодно работать на оптимальной скорости резания, поскольку она является довольно низкой и не обеспечивает высокой производительности обработки.

Проблема усталости, т.е. разрушения твердых сплавов под действием циклически изменяющихся напряжений, более низких, чем предел прочности, освящена также в монографиях Г.С. Креймера [45], В.И. Третьякова [46], В.И. Туманова [47], М. Г. Лошака [48]. В области исследований прочности инструмента проведены работы Г.Н. Титовым, Г.Г. Иноземцевым, И.П. Третьяковым, Г.И. Грановским, А.А. Аваковым, М.В. Касьяном, А.И. Кашириным, Н.Н. Зоревым, Т.Н. Лоладзе, А. И. Бетанели, Б.П. Прибыловым, Л.Г. Куклиным, В.И. Сигаловым, В.В. Серебровским, Л.Г. Хает, М.Ф. Полетика, Е.П. Степановым и др. Однако до настоящего времени, многие вопросы, связанные с прочностью режущей части инструмента, решены недостаточно полно.

При резании процесс накопления повреждений имеет тот же механизм, что и при усталостном нагружении. На начальной стадии процесса происходит накопление упругих искажений кристаллической решетки, затем разрушаются микроскопические объемы материала с образованием микротрещин, которые далее развиваются до макротрещин, приводя к разрушению материала [1]. Поэтому при моделировании изнашивания инструмента в процессе резания можно использовать методику расчета на долговечность при циклическом нагружении.

Согласно этой методике предполагается, что существует предельная кривая, характеризующая потерю несущей способности инструмента, см. рисунок 1.5.

Если взять за основу кривую усталостной прочности, то физический смысл ее следующий: в точке на кривой с координатами (σ_i,N_i) теряется несущая способность конструкции при нагружении с напряжением σ_i и количеством циклов нагружения N_i. При этом поврежденность конструкции принимается за единицу. При работе режущим инструментом изменяются условия его эксплуатации: режимы резания, обрабатываемый материал и т.д. Оценка поврежденности инструмента требует учета изменений амплитуды и среднего напряжения цикла, вызываемого изменением условий обработки.

Поэтому применяется методика линейного суммирования повреждений, (правило Майнера [49]), согласно которому каждое нагружение при определенных условиях резания вносит свою долю в поврежденность, которая определяется отношением n_i к N_i, где n_i – число циклов нагружения при заданных условиях обработки (σ_n), N_i – предельное число циклов для тех же условий обработки. Разрушение (потеря несущей способности) наступает когда $\Sigma \frac{n_i}{N_i} = 1$, эта сумма может изменяться в диапазоне от 0,71 до 1,49 [49].

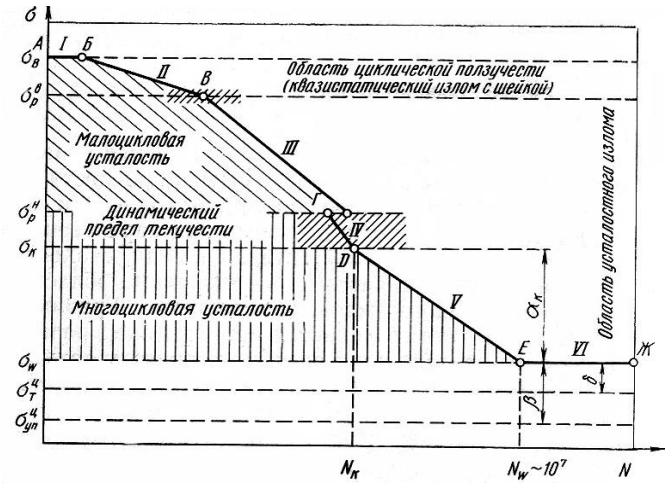


Рисунок 1.5 – Схематичное изображение полной кривой усталости: σ_B – предел прочности, σ_P^B – напряжение верхнего разрыва (первый вид разрыва), σ_P^H – напряжение нижнего разрыва (второй вид разрыва), σ_K – критическое напряжение (третий вид разрыва), σ_ω – предел усталости, $\sigma_T^Ц$ – циклический предел текучести, $\sigma_{уп}^Ц$ – циклический предел упругости, N_k – критическое число циклов нагружения, α_σ:β – константы

Расчет на усталостную прочность на основе предельных кривых усталостного разрушения разработано для условий одноосного напряженного состояния. Так как режущая часть инструмента в процессе эксплуатации находится в сложном напряженном состоянии, изменяющемся в процессе работы, то критерий усталостной прочности должен отражать различную частоту и амплитуду колебаний составляющих тензора напряжений и различные их сочетания. Сравнение ряда критериев, приведенных в литературе, не дают однозначного определения предела несущей способности инструмента. Одновременно с изменением напряжений под действием силовых нагрузок режущая часть инструмента подвергается переменным тепловым нагрузкам, имеющим большое значение при усталостном разрушении инструментальных материалов.

Общее соотношение, описывающее изменение поврежденности конструкционного материала $\omega(t)$ в процессе эксплуатации детали, в том числе изнашиваемого режущего инструмента, можно представить в виде [47]:

$$\omega_{кр} \geq \omega(t) = \omega_{\tau} + \int_0^t J(x_{i,}\tau)d\tau$$

где $\omega_{кр}$ – критическое значение поврежденности; ω_τ – технологическая поврежденность материала; $J(X_i,t)$ – интенсивность изменения поврежденности в момент времени t, зависящая от энергетических факторов воздействия на материал X_i – температуры, нагрузок, физико-химических процессов.

Из анализа условий взаимодействия инструмента с обрабатываемой заготовкой в зоне резания проф. Барзовым А.А. показано целесообразность использования кинетической концепции прочности, развиваемую академиком Журковым С.Н. и его школой [50, 51]. Основополагающая зависимость этой теории имеет вид:

$$t_p = \tau_0 \exp\frac{U_0 - \gamma\sigma}{k\theta}$$

где t_p – время до разрушения материала, в котором действует растягивающее постоянное напряжение σ при температуре θ; k – постоянная Больцмана; τ_0 – постоянная, по порядку величины близкая к периоду тепловых колебаний

атомов; γ – структурный коэффициент, имеющий вероятный характер и физически отражающий среднюю величину перенапряжения на межатомных связях; U_0 – энергия активации разрыва межатомной связи, численно равная (или близкая) к энергии сублимации.

С учетом принципа линейного суммирования поврежденностей (принципа Бейли), впервые использованного в технологи механической обработки при определении стойкости инструмента при нестационарных режимах резания проф. Ярославцевым В.М. [50], текущее значение технологической поврежденности для N-операции представлено в виде:

$$\omega_t = \omega_0 + \sum_{K=1}^{N-1} \omega_K + \int_0^t \frac{d\tau}{\tau_0 \exp \frac{U_0 \gamma \sigma}{k\theta}}$$

$$0 \le \omega_T(t) \le \omega_{кр} = 1$$

Указанное соотношение качественно раскрывает содержание интенсивности изменения поврежденности в момент времени t и позволяет расчетным путем определить ω_T в предположении определенности параметров $U_0, \gamma, \sigma(t)$.

Очевидную трудность вызывает определение некоторых эквивалентных значений постоянных U_0, γ, описывающих процесс изнашивания инструмента. Физически обоснованным представляется приложение кинетической теории прочность твердых тел, предложенной академиком С.Н. Журковым, к единичным актам разрушения отдельных микрочастиц при изнашивании инструмента.

Следует также отметить, что экспериментальные исследования временной зависимости прочности акад. С.Н. Журкова с сотрудниками проводились для простейшего случая – растяжения тонких проволок. Однако даже в этом случае расширение температурного интервала или увеличения диапазона напряжений часто приводило к отклонению экспериментальных данных от соотношения. Не найден также и переход от одноосного растяжения к другим видам нагружения [50]. Кроме этого для определения долговечности в настоящее время применяют кинетическую теорию прочности, которая опирается на фундаментальные основания статической физики. Особенностью временных эффектов в кинетической теории

прочности является их универсальный характер, что приводит к выводу об их единой причине – термофлуктуационной обусловленности. Долговечность по Журкову С.Н. является одной из важнейших прочностных характеристик материала, и в этом смысле, играет вполне самостоятельную роль в выборке материала для режущего инструмента, причем любого (резец, сверло и т.д.). Хотя, следует отметить, эта характеристика отличается от других прочностных характеристик, фигурирующих в справочниках (например: модуль Юнга, твердость и т.д.). По своему смыслу долговечность носит прогностический характер.

1.5 Цель и задачи исследований

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 Uэф;

- 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 УПРОЧНЕНИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ПОДЛОЖКУ

Повышение эффективности обработки осуществляется как путем уменьшения сопротивления материала резанию, так и путем увеличения сопротивления инструмента изнашиванию.

Уменьшение сопротивления материала резанию достигается в результате:

- разупрочняющей термообработки;
- предварительного нагревания;
- уменьшения поверхностного натяжения при адсорбции поверхностно-активных веществ;
- уменьшения угла трения инструмента за счет применения смазок.

Увеличение сопротивления инструмента изнашиванию достигается в результате:

- поверхностного упрочнения (в том числе путем нанесения тонких защитных покрытий);
- охлаждения инструмента (поливом жидкостью или подводом ее через инструмент);
- уменьшения напряжений в инструменте за счет рационализации его конструкции.

В машиностроении для уменьшения сопротивления изнашиванию и увеличения производительности используют режущий инструмент со сплошным покрытием. Однако сплошное покрытие, наносимое на режущий инструмент, разрушается в результате высоких контактных силовых и температурных нагрузок.

Одной из причин преждевременного разрушения покрытия является возникновение критических напряжений на границе раздела «покрытие – основа» при термомеханическом нагружении контактных площадок

инструмента. Эти напряжения зависят от разницы теплофизических и физико-механических свойств материалов износостойкого покрытия и инструмента, собственных микронапряжений инструментального материала после полной термообработки.

Для повышения долговечности режущего инструмента с покрытием, необходим новый метод нанесения покрытия, способствующий увеличению запаса прочности и жесткости, снижению склонности режущего клина инструмента к потере формоустойчивости и термопластическим прогибам при приложении термомеханических напряжений, возникающих в процессе обработки.

Нанесение диффузионного покрытия на режущий инструмент оказывает влияние не только на механические его свойства, увеличивая износостойкость, но и прочность инструмента в целом, за счет увеличения его жесткости [52,53]. Однако использование дискретного (или ячеистого) оксидного слоя облегчает условия релаксации напряжений на поверхностях режущего инструмента. 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. Дискретным (или ячеистым) оксидным слоем будем называть геометрически упорядоченную совокупность локальных зон с покрытием и области без покрытия между ними. Возможность изменения геометрических характеристик на стадии формирования оксидного слоя подразумевает возможность регулирования соотношения между протяженностями вышеупомянутых зон по длине контакта режущей кромки инструмента. Отметим, что подобная возможность отсутствует для случая технологических неоднородностей, рассмотренных в работах Барзова А.А. [54] применительно к проблеме фрикционного изнашивания с участием локальных зон фактического контакта, упрощающая версия представлена на рисунке 2.1.

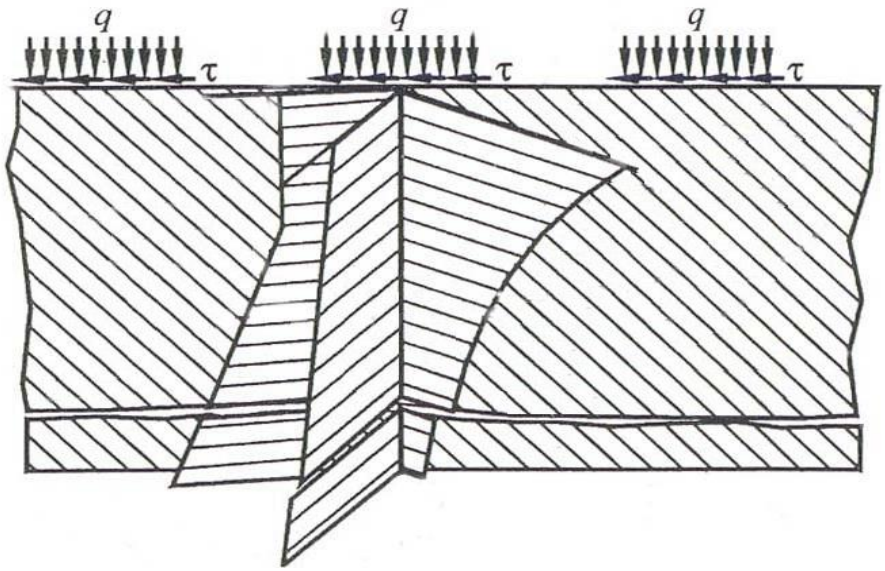


Рисунок 2.1 – Расчетная схема износа контактной поверхности с учетом исходной поврежденности материалов

Одной из мотиваций такого структурирования является возможность использования эффекта торможения, и даже остановки образовавшейся в процессе эксплуатации локальной трещины методом создания на ее пути дискретного оксидного слоя с пониженным значением модуля упругости. При этом общее уменьшение модуля упругости образца за счет ячеистости упрочнения может служить интегральной характеристикой его способности препятствовать распространению трещин. Предполагается, что ячеистость будет способствовать увеличению его эксплуатационной стойкости к деформационным модификациям за счет независимости деформационных повреждений отдельных его ячеек.

Особенностью ячеистой модели образца, (см. рисунок 2.1) является определение его свойств посредством определения свойств одной ячейки.

2.1 Разработка теоретической модели долговечности образца с диффузионным дискретным оксидным слоем

Ввиду отсутствия известных публикаций по сопоставлению свойств сплошных и ячеистых оксидных слоев в качестве первого шага был

осуществлен теоретический анализ влияния ячеистости оксидного слоя на прочностные свойства образца по отношению к деформации растяжения. Анализ проводился на основе теоретической модели упругого деформирования образца из произвольного инструментального материала с исходной геометрией прямоугольного параллелепипеда длиной $L_И$, шириной $H_И$ и толщиной $h_И$, (см. рисунок 2.2). При этом предполагалось, что поверхность $L_И$ x $H_И$ недеформированного образца может быть представлена в виде набора условных квадратных ячеек со стороной l, когда

$$L_И = n_1 \cdot l \quad и \quad H_И = n_2 \cdot l$$

где n_1 и n_2 – соответственно количество элементарных ячеек в продольном и поперечном направлениях по отношению к растягивающей нагрузке P.

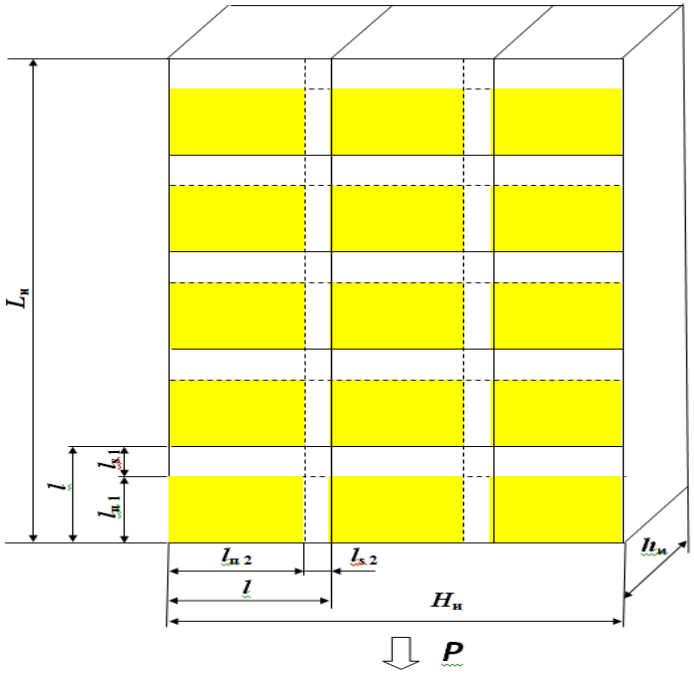


Рисунок 2.2 – Теоретическая модель плоского образца с дискретным оксидным слоем

Предположим, что на одну из поверхностей образца нанесен диффузионный дискретный оксидный слой толщиной $h_П$ с использованием маскирующей сетки, а образующиеся поперечные и продольные маскирующие полосы имеют ширину l_{S1} и l_{S2} соответственно. При этом геометрия согласована с условными ячейками таким образом, что внутри каждой ячейки поверхность имеет вид примыкающего к ее левому нижнему углу прямоугольника со сторонами $l_{П1}$ и $l_{П2}$

$l_{П1} = l - l_{S1}$

в направлении действующей нагрузки и

$l_{П2} = l - l_{S2}$

в поперечном к ней направлении, (см. рисунок 2.2), где $l_{П1}$ x $l_{П2}$ – размеры прямоугольной площади с покрытием для элементарной ячейки, $h_П$ толщина покрытия.

Результатом описанных геометрических идеализаций является возможность объемного представления элементарной ячейки в виде условного набора трех прямоугольных параллелепипедов №1, №2 и №3, обладающих различными площадями поперечных сечений S_i и продольными размерами l_i^*, (см. рисунок 2.3).

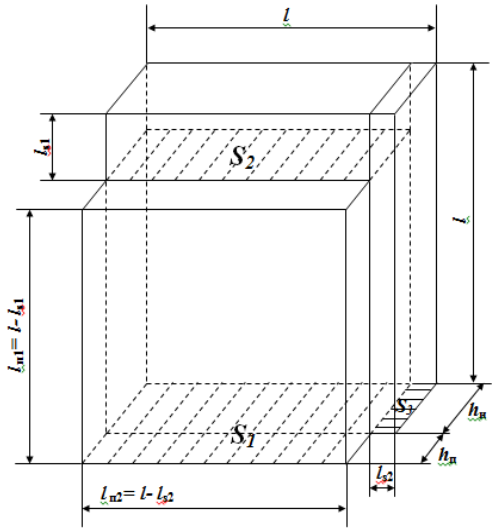


Рисунок 2.3 – Модель одной элементарной ячейки идеализированного плоского образца

На рисунке 2.3 показаны площади оснований прямоугольных параллелепипедов №№1, 2 и 3 образующих элементарную ячейку с учетом наличия покрытия, при этом $h_П << h_И$. Наполнением параллелепипедов №2 и №3 – служит инструментальный материал, а параллелепипеда №1 - инструментальный материал и материал покрытия. Таким образом, параллелепипед №1 сам может рассматриваться как составленный из двух прямоугольных параллелепипедов №1′ и №1″ с одинаковыми продольными размерами l_i^*, но обладающих различными поперечными сечениями и наполнениями. При этом:

$S = l \cdot h_И = S_1' + S_3$,

- площадь основания элементарной ячейки без покрытия.

$S_1 = S_1' + S_1'' = (1 + h_П/h_И) \cdot (1 - l_{S2}/l) \cdot S$,

- площадь основания параллелепипеда №1.

$S_1' = l_{П2} \cdot h_И = (1 - l_{S2}/l) \cdot S$,

- площадь основания параллелепипеда №1′ (наполнитель – инструментальный материал).

$S_1'' = l_{П2} \cdot h_П = h_П/h_И\ (1 - l_{S2}/l) \cdot S$,

- площадь основания параллелепипеда №1″ (наполнитель – покрытие).

$S_2 = l_{П2} \cdot h_И = (1 - l_{S2}/l) \cdot S = S_1'$,

- площадь основания параллелепипеда №2.

$S_3 = l_{S2} \cdot h_И = (l_{S2}/l) \cdot S$,

- площадь основания параллелепипеда №3.

Исходя, из выше сказанного можно отметить, что идеализированная модель продольного деформирования плоского образца с оксидным слоем имеет следующие допущения:

- растягивающая нагрузка P равномерно распределена по составленным из элементных ячеек продольным полосам длиной $L_И$ в количестве n_2;

- продольные и поперечные деформации всех элементарных ячеек равны между собой и происходят без нарушения геометрической структуры, изображенной на рисунке 2.2, а значит и общих границ соприкасающихся поверхностей инструментального материала и покрытия;

- инструментальный материал и покрытие рассматриваются как сплошные однородные среды.

Тогда выражение для нагрузки, приходящейся на одну полосу, равно как и на одну элементарную ячейку, имеет вид

$p = P/ n_2 = (P/ H_И) \cdot l$,

и для относительной продольной деформации ε одной продольной полосы, имеем:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_И}{L_И} = \frac{n_1 \cdot \Delta \ell}{n_1 \cdot \ell} = \frac{\Delta \ell}{\ell},$$

При этом эффективная жесткость по отношению к растяжению для всего образца $К_Э$ оказывается связанной с эффективной жесткостью одной ячейки $k_э$ соотношением:

$$К_Э = P/\varepsilon = (p/\varepsilon) \cdot n_2 = k_э \cdot n_2 ,$$

где $К_Э$ – эффективная жесткость для всего образца; $k_э$ – эффективная жесткость для одной элементарной ячейки.

$$К_Э = Е_{ипs} \cdot S = (Е_{ипs}/Е_и) \cdot k_и,$$

где $Е_и$ – модуль Юнга инструментального материала; $Е_{ипs}$ – эффективный модуль Юнга для образца из инструментального материала с оксидным слоем поверхности; $k_и = Е_и \cdot S$ – жесткость для одной элементарной ячейки без покрытия.

Очевидно, что эффективная жесткость одной элементарной ячейки должна определяться через жесткости входящих в ее состав параллелепипедов №№ 1′, 1″, 1, 2 и 3. Определим $k_{1э}$ выражением:

$$k_{1Э} = Е_{ип} \cdot S_1' = (Е_{ип}/ Е_и) \cdot (1 - l_{S2}/l) \cdot k_и,$$

где $k_{1э}$ - эффективная жесткость для параллелепипеда №1 (комплекс из №1′ и №1″); $Е_{ИП}$ – эффективный модуль Юнга для образца из инструментального материала со сплошным покрытием поверхности. При этом:

$$k_1' = Е_и \cdot S_1' = (1 - l_{S2}/l) \cdot k_и$$

– жесткость параллелепипеда №1′ .

$$k_1'' = Е_п \cdot S_1'' = [(Е_п/ Е_и) \cdot (h_п/h_и)] \cdot (1 - l_{S2}/l) \cdot k_и$$

– жесткость параллелепипеда №1″; $Е_п$ - модуль Юнга материала покрытия.

$$k_2 = Е_п \cdot S_2 = (1 - l_{S2}/l) \cdot k_и = k_1'$$

– жесткость для параллелепипеда №2.

$$k_{12Э} = Е_{12Э} \cdot S_1' = (Е_{12Э}/ Е_и) \cdot (1 - l_{S2}/l) \cdot k_и$$

– эффективная жесткость для комплекса из параллелепипедов №1 и №2; $Е_{12Э}$ – эффективный модуль Юнга для комплекса из параллелепипедов №1 и №2.

$$k_3 = Е_и \cdot S_3 = (l_{S2}/l) \cdot k_и$$

– жесткость для параллелепипеда № 3.

Для определения прочностных свойств элементарной ячейки при растягивающей нагрузке, выразим продольную нагрузку p, действующую на элементарную ячейку, посредством суммы двух составляющих рисунке 2.4.

$$p = p_{12} + p_3$$

где p_{12} – компонента p, действующая на комплекс из параллелепипедов №1 и №2; p_3 – компонента p, действующая на параллелепипед №3. Кроме того:

$$p_{12} = p_{12}' + p_{12}'',$$

где p_{12}' – компонента p_{12}, действующая на комплекс из параллелепипедов №1′ и №2 (наполнение только из инструментального материала); p_{12}'' – компонента p_{12}, действующая на параллелепипед №1″ (наполнение только из материала покрытия).

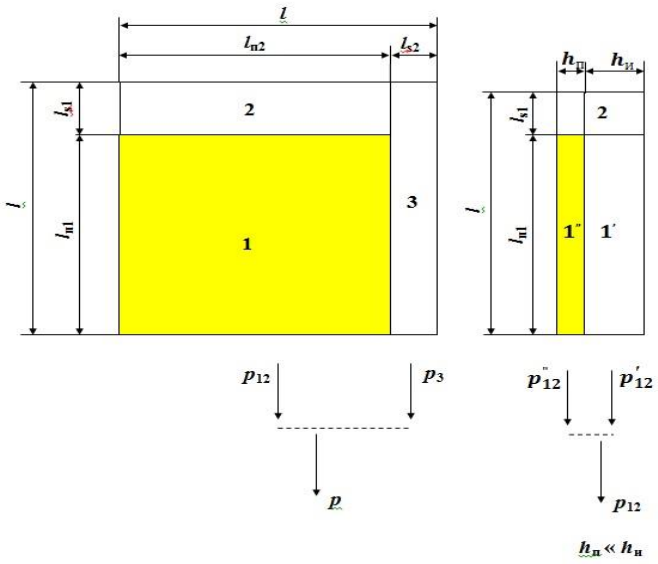


Рисунок 2.4 – Силовые компоненты растягивающей нагрузки P

Принципиальной особенностью рассматриваемой модели является сопоставление деформации упругого растяжения сплошного покрытия и дискретного оксидного слоя; модуля упругости и коэффициента Пуассона, формально выступающего в роли интегральной характеристики композиции «покрытие-основа». Такой подход позволяет максимально абстрагироваться от значительно усложняющего теоретический анализ комплекса индивидуальных свойств покрытий и использовать в качестве базовой основы сопоставления взаимосвязь величины $E_{ипs}$ с ее двумя предельными значениями $E_и$ и $E_{ип}$, регулируемую геометрическими параметрами экранирующей сетки. При этом априори предполагается удовлетворение

покрытий требованию отсутствия деформационных повреждений типа трещин и отслоений, а величина $E_{ип}$ формально выступает в роли интегральной характеристики влияния сплошного покрытия, учитывающей в неявной форме весь комплекс его индивидуальных свойств. Более того, описанная идеализированная модель равным образом применима и к случаю симметричного расположения оксидного слоя на двух противоположных поверхностях образца, что оказывает влияние лишь на численное значение величины $E_{ип}$. Кроме этого, с помощью идеализированной модели можно оценить влияние ячеистости покрытия на величину коэффициента Пуассона.

Поскольку покрытие не является самостоятельным материалом, а работает как композиция с основой, то в рассмотренной идеализированной модели используются такие эффективные «композиционные» величины как модуль упругости и коэффициент Пуассона для образца из инструментального материала со сплошным покрытием поверхности $E_{ип}$ и $\mu_{ипs}$, в совокупности с характеристиками инструментального материала $E_{ип}$ и $\mu_{и}$, определяющие эффективные характеристики образца из инструментального материала с локальным покрытием поверхности $E_{ипs}$ и $\mu_{ипs}$

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 2.2). Деформации по ширине $H_{И}$ характеризует величина коэффициента Пуассона $\mu_{ипs}$, а деформации по толщине $h_{и}$ определяются величиной коэффициента Пуассона инструментального материала $\mu_{и}$.

Формальным регулятором деформационных изменений ширины $\Delta H_{и}$, как и длины $\Delta L_{и}$, является поверхность с наличием дискретного оксидного слоя, приводящая к наличию границ (области без покрытия), препятствующих поверхностному распространению трещин в покрытии.

Величинам $L_{и}$ и $H_{и}$ поставим в соответствие абсолютные деформации $\Delta L_{и}$ и $\Delta H_{и}$:

$$L_{и} \rightarrow \Delta L_{и} = n_{1} \cdot \Delta l,\ \Delta l = \Delta l_{п1} + \Delta l_{s1}$$ – продольные деформации;

$H_и \rightarrow \Delta H_и = n_2 \bullet \Delta l_{\perp}$, $\Delta l_{\perp} = \Delta l_{п2} + \Delta l_{s2}$ – поперечные деформации

где Δl, $\Delta l_{\perp}$ – соответственно продольная и поперечная (по ширине) деформации одной элементарной ячейки.

Конкретизируем основные допущения:

1. Деформации носят упругий характер (работает закон Гука):

$$\frac{\Delta L_и}{L_и} = \frac{P}{K_э} \rightarrow \frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{p}{k_э},$$

$$\frac{\Delta H_и}{H_и} = -\mu_{ипs} \frac{\Delta L_и}{L_и} \rightarrow \frac{\Delta \ell_{\perp}}{\ell} = -\mu_{ипs} \frac{\Delta \ell}{\ell}.$$

2. Влиянием деформаций на жесткости можно пренебречь.

3. Деформации не приводят к искажениям прямоугольности выделенных геометрических структур и к смещениям их взаимных границ:

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{P}{k_э} = \frac{p_{12}}{k_{12э}} = \frac{p_3}{k_3}$$

– условия одинаковости относительных продольных деформаций у параллелепипеда №1 и у составляющих его параллелепипедов №1′ и №1″

$$\Delta \ell = \Delta \ell_{п1} + \Delta \ell_{s1}, \qquad \Delta \ell_{s1} = \frac{p_{12}}{k_2} \Delta \ell_{s1}$$

(компонента p_{12} действует как на комплекс из параллелепипедов №1 и №2, так и на каждый из них по отдельности);

– условия представления абсолютной продольной деформации элементарной ячейки в целом в виде суммы абсолютных продольных деформаций параллелепипедов №1 и №2;

$$\frac{\Delta \ell_{п2}}{\ell_{п2}} = -\mu_{ип} \frac{\Delta \ell_{п1}}{\ell_{п1}} = -\mu_{и} \frac{\Delta \ell_{s1}}{\ell_{s1}}$$

– условия одинаковости относительных поперечных деформаций параллелепипедов №1 и №2 (подразумевается допустимость применения эффективного коэффициента $\mu_{ип}$ как по отношению к параллелепипеду №1′, так и по отношению к параллелепипеду №1″);

$$\Delta \ell_{\perp} = \Delta \ell_{п2} + \Delta \ell_{s2}, \qquad \Delta \ell_{s2} = -\mu_{и} \frac{\Delta \ell}{\ell} \cdot \ell_{s2}$$

– условия представления абсолютной поперечной деформации элементарной ячейки в целом в виде суммы абсолютных поперечных деформаций параллелепипедов №1 и №3.

Определим растягивающие напряжения для каждой элементарной ячейки (параллелепипеда):

$$\sigma_1' = \frac{k_1'}{S_1'} \cdot \frac{\Delta\ell_{п1}}{\ell_{п1}} = E_и \frac{\Delta\ell_{п1}}{\ell_{п1}} = \frac{p'_{12}}{S_1'},$$

– для параллелепипеда №1′;

$$\sigma_1'' = \frac{k''_1}{S_1''} \cdot \frac{\Delta\ell_{п1}}{\ell_{п1}} = E_п \frac{\Delta\ell_{п1}}{\ell_{п1}} = \frac{p''_{12}}{S_1''},$$

– для параллелепипеда №1″;

$$\sigma_{1э} = \frac{k'_{1э}}{S_1'} \cdot \frac{\Delta\ell_{п1}}{\ell_{п1}} = E_{ип} \frac{\Delta\ell_{п1}}{\ell_{п1}},$$

– эффективное напряжение для параллелепипеда №1 (комплекс из №1′ и №1″),

$$\sigma_2 = \frac{k_2}{S_2} \cdot \frac{\Delta\ell_{s1}}{\ell_{s1}} = E_и \frac{\Delta\ell_{s1}}{\ell_{s1}},$$

– для параллелепипеда №2,

$$\sigma_{12э} = \frac{k_{12э}}{S_1'} \cdot \frac{\Delta\ell}{\ell} = E_{12э} \frac{\Delta\ell}{\ell},$$

– эффективное напряжение для комплекса параллелепипедов №1 и №2, причем

$$\sigma_{1э} = \sigma_2 = \sigma_{12э} = \frac{p_{12}}{S_1'},$$

$$\sigma_з = \frac{k_з}{S_з} \cdot \frac{\Delta l}{l} = E_и \frac{\Delta l}{l} = \frac{p_з}{S_з},$$

– для параллелепипеда №3.

Тогда эффективное напряжение для элементарной ячейки в целом будет равно:

$$\sigma_э = \frac{k_э}{S} \cdot \frac{\Delta\ell}{\ell} = E_{ипs} \cdot \frac{\Delta\ell}{\ell} = \frac{p}{S},$$

Сокращения и обобщения формулировок зависимостей можно осуществить путем использования безразмерных переменных

$$x_1 = \frac{\ell_{s1}}{\ell}, \qquad x_2 = \frac{\ell_{s2}}{\ell};$$

$$Y_{ипs1} = \frac{E_{ипs1}}{E_и}, \quad M_{ипs1} = \frac{\mu_{ипs1}}{\mu_и},$$

– для $x_2 = 0$ (зависимость только от x_1);

$$Y_{ипs2} = \frac{E_{ипs2}}{E_и}, \quad M_{ипs2} = \frac{\mu_{ипs2}}{\mu_и},$$

– для $x_1 = 0$ (зависимость только от x_2);

$$A = \frac{E_{ип}}{E_и} - 1, \qquad B = \frac{\mu_и}{\mu_{ип}} - 1;$$

где: A и B – эффективные параметры двухпредельного подхода «отсутствие покрытия – сплошное покрытие» используемые при рассмотрении дискретного оксидного слоя. Покрытия, характеризуются увеличенными значениями модуля Юнга и меньшими значениями коэффициента Пуассона, (см. таблицу 2.1) [55, 56], чем материал металлической основы, откуда следует:

$$\begin{cases} E_{ип} > E_и, \\ \mu_{ип} < \mu_и. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E_{ипs} \in [E_и; E_{ип}], \\ \mu_{ипs} \in [\mu_{ип}; \mu_и]. \end{cases}$$

Таблица 2.1 – Сопоставление упругих свойств металлов и их соединений, используемых в качестве покрытий

Основной металл	Соединение	Решетка	Модуль упругости E, ГПа	Коэффициент Пуассона μ
	-	ГЕК	110	0,33
	TiC	КУБ	460	0,19
			494	-
	TiN	КУБ	256	0,25
			390-500	-
	TiO_2		205	-
Zr	-	ГЕК	84-97	0,35
	ZrC	КУБ	355	0,19
			401	-
	ZrN	КУБ	400	0,24
			300-450	-
	ZrO_2		190	-
Hf	-	ГЕК	79-150	0,29
	HfC	КУБ	359	0,18
			480	-

продолжение таблицы 2.1

	HfN	КУБ	-	0,28
			480	-
V	-	КУБ	139-170	0,36
	VC	КУБ	430	-
			495	-
	VN	КУБ	-	0,25
			350-460	-
Nb	-	КУБ	91-160	0,39
	Nb_2C	КУБ	345	0,21-0,23
	NbC	КУБ	479	-
	NbN	ГЕК	493	0,26
			400-483,6	-
Ta	-	КУБ	190	0,35
	TaC	КУБ	440	-
			550	-
	Ta_2Cr	ГЕК	291	0,24
	TaN	ГЕК	587	0,26
			575,8	-
	Ta_2N	ГЕК	-	0,25
	Cr_7C_3	ГЕК	380	-
	Cr_3C_2	РОМ	369,8	-
Ta	CrN	КУБ	330	-
			319,8	-
	Cr_2N	ГЕК	310	-
Mo	-	КУБ	300-330	0,31
	Mo_2C	ГЕК	544	-
			530,7	-
W	-	КУБ	350-400	0,3
	WC	ГЕК	710	0,19
			737	-
	W_2C	ГЕК	428	-

Сопоставление упругих свойств технически чистых металлов, (см. таблицу 2.2 и рисунок 2.5) свидетельствует о том, что образец из металла с большим значением модуля упругости E (более жесткий) вовсе не обязательно характеризуется меньшим значением коэффициента Пуассона μ (меньшим поперечным сжатием при продольном растяжении).

Таблица 2.2 – Общая зависимость μ(E) для металлов при t = 20°C

Металл	E, ГПа	μ	r, нм	Реш.	Пер.	Ряд	Гр.	n
Цезий (Cs)	1,75	-	0,262	ОЦК	6	VIII	I	55
Рубидий (Rb)	2,5	-	0,248	ОЦК	5	VI	I	37
Литий (Li)	5	0,42	0,157	ОЦК	2	II	I	3
Таллий (Tl)	8	-	0,171	ГЕК	6	IX	III	81
Индий (In)	10,5	0,46	0,166	ТЕТ	5	VII	III	49
Свинец (Pb)	14-18	0,45	0,175	ГЦК	6	IX	IV	82
Иттербий (Yb)	18	-	0,193	ГЦК	6	VIII	III	70
Кальций (Ca)	26	-	0,197	ГЦК	4	IV	II	20
Висмут (Bi)	32	0,33	0,182	РМЭ	6	IX	V	83
Самарий	34-55	0,35	0,180	РМЭ	6	VIII	III	62
Празеодим (Pr)	35-98	0,3	0,182	ГЕК	6	VIII	III	59
Лантан (La)	38	0,26	0,187	ГЕК	6	VIII	III	57
Неодим (Nd)	38	0,28	0,182	ГЕК	6	VIII	III	60
Олово (Sn)	41-55	0,33	0,158	ТЕТ	5	VII	IV	50
Магний (Mg)	42,5-45	0,35	0,160	ГЕК	3	III	II	12
Церий (Ce)	44	0,25	0,182	ГЦК	6	VIII	III	58
Теллур (Te)	44	-	0,170	ГЕК	5	VII	VI	52
Кадмий (Cd)	50-53	0,3	0,156	ГЕК	5	VII	II	48
Селен (Se)	55	0,45	0,160	ГЕК	4	V	VI	34
Гадолиний (Gd)	56-98	0,26	0,179	ОЦК	6	VIII	III	64
Сурьма (Sb)	57-78	-	0,161	РМЭ	5	VII	V	51
Тербий (Tb)	57,5	-	0,177	ГЕК	6	VIII	III	65
Диспрозий (Dy)	64-98	0,24	0,177	ГЕК	6	VIII	III	66

продолжение таблицы 2.2

Иттрий (Y)	66	0,27	0,181	ГЕК	5	VI	III	39
Гольмий (Ho)	67	-	0,176	ГЕК	6	VIII	III	67
Алюминий (Al)	69-72	0,31	0,143	ГЦК	3	III	III	13
Серебро (Ag)	72-83,5	0,37	0,144	ГЦК	5	VII	I	47
Эрбий (Er)	73-115	0,24	0,176	ГЕК	6	VIII	III	68
Торий (Th)	74-80	-	0,180	ГЦК	7	X	III	90
Золото (Au)	78-83	0,4	0,144	ГЦК	6	IX	I	79
Гафний (Hf)	79-150	0,29	0,159	ГЕК	6	VIII	IV	72
Германий (Ge)	82	-	0,139	АЛМ	4	V	IV	32
Цирконий (Zr)	84-97	0,35	0,160	ГЕК	5	VI	IV	40
Ниобий (Nb)	91-160	0,39	0,145	ОЦК	5	VI	V	41
Цинк (Zn)	100-130	0,3-0,35	0,137	ГЕК	4	V	II	30
Титан (Ti)	110	0,33	0,146	ГЕК	4	IV	IV	22
Медь (Cu)	110-130	0,38	0,128	ГЦК	4	V	I	29
Кремний (Si)	110-160	-	0,118	АЛМ	3	III	IV	14
Палладий (Pd)	115-125	0,39	0,137	ГЦК	5	VI	VIII_3	46
Ванадий (V)	139-170	0,36	0,131	ОЦК	4	IV	V	23
Платина (Pt)	150-175	0,36	0,139	ГЦК	6	VIII	VIII_3	78
Тантал (Ta)	190	0,35	0,146	ОЦК	6	VIII	V	73
Железо (Fe)	195-205	0,28	0,126	ОЦК	4	IV	VIII_1	26
Марганец (Mn)	200	-	0,130	КУБ	4	IV	VII	25
Никель (Ni)	200-220	0,3-0,4	0,124	ГЦК	4	IV	VIII_3	28
Кобальт (Co)	206	0,32	0,125	ГЕК	4	IV	VIII_2	27

продолжение таблицы 2.2

Уран (U)	210	-	0,120	РОМ	7	X	III	92
Хром (Cr)	280-315	0,31	0,127	ОЦК	4	IV	VI	24
Бериллий (Be)	300	0,03	0,113	ГЕК	2	II	II	4
Молибден (Mo)	300-330	0,31	0,140	ОЦК	5	VI	VI	42
Бор (B)	345	-	0,097	ТЕТ	2	II	III	5
Вольфрам (W)	350-400	0,3	0,141	ОЦК	6	VIII	VI	74
Родий (Rh)	385	0,26	0,137	ГЦК	5	VI	VIII_2	45
Рутений (Ru)	420-500	0,31	0,134	ГЕК	5	VI	VIII_1	44
Рений (Re)	475	-	0,137	ГЕК	6	VIII	VII	75
Иридий (Ir)	520-500	0,28	0,136	ГЦК	6	VIII	VIII_2	77
Осмий (Os)	575	0,28	0,136	ГЕК	6	VIII	VIII_1	76

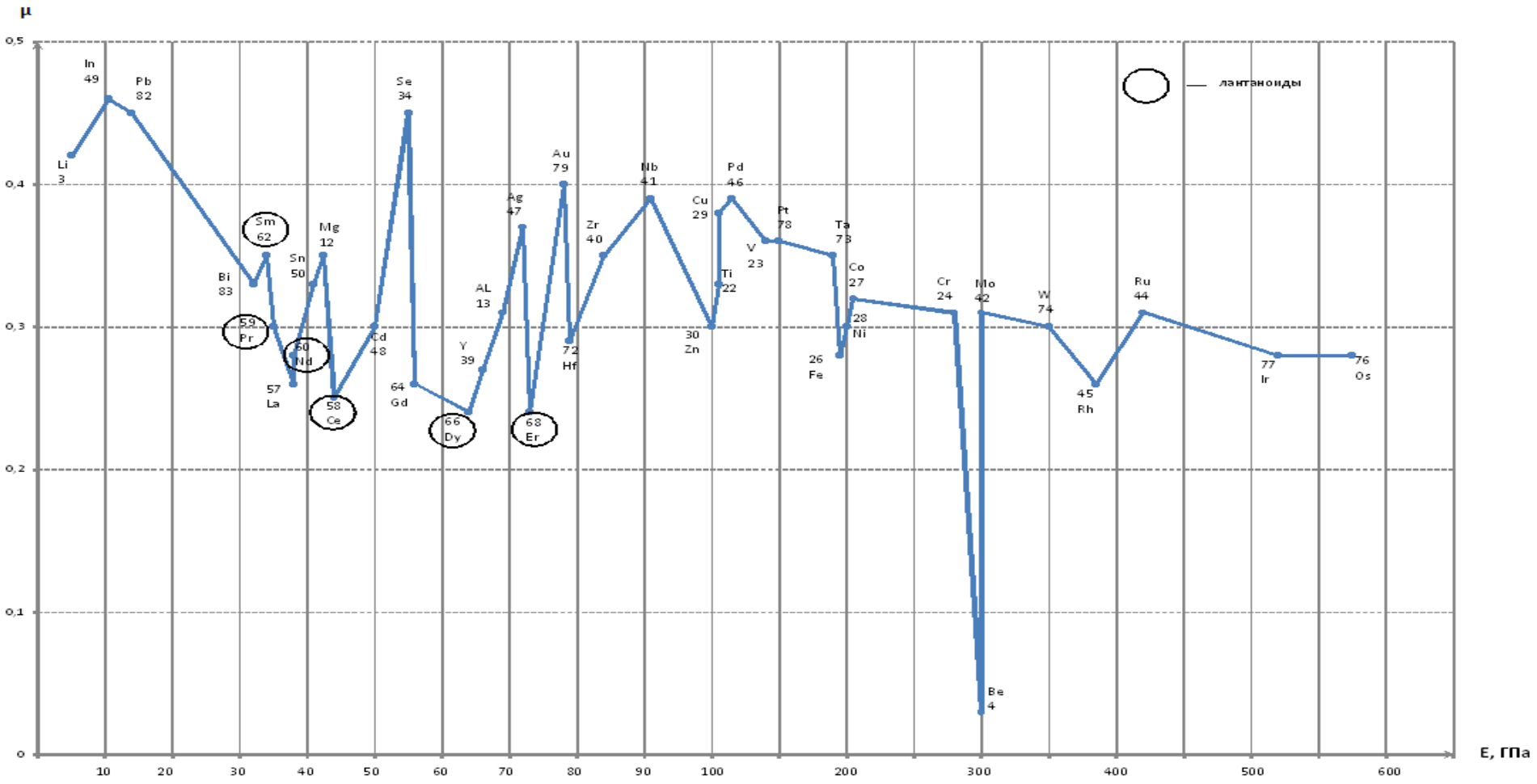


Рисунок 2.5 – График зависимости μ(E) для чистых металлов

График зависимости μ(E) на рисунок 2.5, построенный с использованием данных из таблицы 2.2, носит пилообразный характер и не демонстрирует явно выраженной закономерности.

Наличие некоторой слабо выраженной корреляции в измерениях E и μ обнаруживается при сравнении зависимостей E(n) и μ(n), где n – порядковый номер элемента в таблице Менделеева, отображаемых (см.таблицу 2.3 и графически на рисунке 2.6), («провалы» μ в области «пиков» E), согласно которым лишь зависимость E(n) носит вполне четкий периодический характер. График зависимости r(n), где r – атомный радиус элементы, свидетельствует о наличии встречных тенденций в периодических изменениях r и E.

Таблица 2.3 – Упругие свойства металлов в свете периодической таблицы Менделеева

Металл	n	Период	Ряд	Группа	r, нм	Реш.	E, ГПа	μ
Литий (Li)	3	2	II	I	0,157	ОЦК	5	0,42
Бериллий (Be)	4	2	II	II	0,113	ГЕК	300	0,03
Бор (B)	5	2	II	III	0,097	ТЕТ	345	-
Магний (Mg)	12	3	III	II	0,16	ГЕК	42,5-45	0,35
Алюминий (Al)	13	3	III	III	0,143	ГЦК	69-72	0,31
Кремний (Si)	14	3	III	IV	0,118	АЛМ	110-160	-
Кальций (Ca)	20	4	IV	II	0,197	ГЦК	26	-
Титан (Ti)	22	4	IV	IV	0,146	ГЕК	110	0,33
Ванадий(V)	23	4	IV	V	0,131	ОЦК	139-170	0,36
Хром (Cr)	24	4	IV	VI	0,127	ОЦК	280-315	0,31
Марганец (Mn)	25	4	IV	VII	0,13	КУБ	200	-
Железо (Fe)	26	4	IV	VIII_1	0,126	ОЦК	195-205	0,28
Кобальт (Co)	27	4	IV	VIII_2	0,125	ГЕК	206	0,32

продолжение таблицы 2.3

Никель (Ni)	28	4	IV	VIII_3	0,124	ГЦК	200-220	0,3-0,4
Медь (Cu)	29	4	V	I	0,128	ГЦК	110-130	0,38
Цинк (Zn)	30	4	V	II	0,137	ГЕК	100-130	0,3-0,35
Германий (Ge)	32	4	V	IV	0,139	АЛМ	82	-
Селен (Se)	34	4	V	VI	0,16	ГЕК	55	0,45
Рубидий (Rb)	37	5	VI	I	0,248	ОЦК	2,5	-
Иттрий (Y)	39	5	VI	III	0,181	ГЕК	66	0,27
Цирконий (Zr)	40	5	VI	IV	0,160	ГЕК	84-97	0,35
Ниобий (Nb)	41	5	VI	V	0,145	ОЦК	91-160	0,39
Молибден (Mo)	42	5	VI	VI	0,140	ОЦК	300-330	0,31
Рутений (Ru)	44	5	VI	VIII_1	0,134	ГЕК	420-500	0,31
Родий (Rh)	45	5	VI	VIII_2	0,137	ГЦК	385	0,26
Палладий (Pd)	46	5	VI	VIII_3	0,137	ГЦК	115-125	0,39
Серебро (Ag)	47	5	VII	I	0,144	ГЦК	72-83,5	0,37
Кадмий (Cd)	48	5	VII	II	0,156	ГЕК	50-53	0,3
Индий (In)	49	5	VII	III	0,166	ТЕТ	10,5	0,46
Олово (Sn)	50	5	VII	IV	0,158	ТЕТ	41-55	0,33
Сурьма (Sb)	51	5	VII	V	0,161	РМЭ	57-78	-
Теллур (Te)	52	5	VII	VI	0,17	ГЕК	44	-
Цезий (Cs)	55	6	VIII	I	0,262	ОЦК	1,75	-
Лантан (La)	57	6	VIII	III	0,187	ГЕК	38	0,26
Церий (Ce)	58	-	-	-	0,182	ГЦК	44	0,25
Празеодим (Pr)	59	-	-	-	0,182	ГЕК	35-98	0,3

продолжение таблицы 2.3

Неодим (Nd)	60	-	-	-	0,182	ГЕК	38	0,28
Самарий (Sm)	62	-	-	-	0,18	РМЭ	34-55	0,35
Гадолиний (Gd)	64	-	-	-	0,179	ОЦК	56-98	0,26
Тербий (Tb)	65	-	-	-	0,177	ГЕК	57,5	-
Диспрозий (Dy)	66	-	-	-	0,177	ГЕК	64-98	0,24
Гольмий (Ho)	67	-	-	-	0,176	ГЕК	67	-
Эрбий (Er)	68	-	-	-	0,176	ГЕК	73-115	0,24
Иттербий (Yb)	70	-	-	-	0,193	ГЦК	18	-
Гафний (Hf)	72	6	VIII	IV	0,159	ГЕК	79-150	0,29
Тантал (Ta)	73	6	VIII	V	0,146	ОЦК	190	0,35
Вольфрам (W)	74	6	VIII	VI	0,141	ОЦК	350-400	0,3
Рений (Re)	75	6	VIII	VII	0,137	ГЕК	475	-
Осмий (Os)	76	6	VIII	VIII_1	0,136	ГЕК	575	0,28
Иридий (Ir)	77	6	VIII	VIII_2	0,136	ГЦК	520-590	0,28
Платина (Pt)	78	6	VIII	VIII_3	0,139	ГЦК	150-175	0,36
Золото (Au)	79	6	IX	I	0,144	ГЦК	78-83	0,4
Таллий (Tl)	81	6	IX	III	0,171	ГЕК	8	-
Свинец (Pb)	82	6	IX	IV	0,175	ГЦК	14-18	0,45
Висмут (Bi)	83	6	IX	V	0,182	РМЭ	32	0,33
Актиний (Ac)	89	7	X	III	-	-	-	-
Торий (Th)	90	-	-	-	0,180	ГЦК	74-80	-
Уран (U)	92	-	-	-	0,12	РОМ	210	-

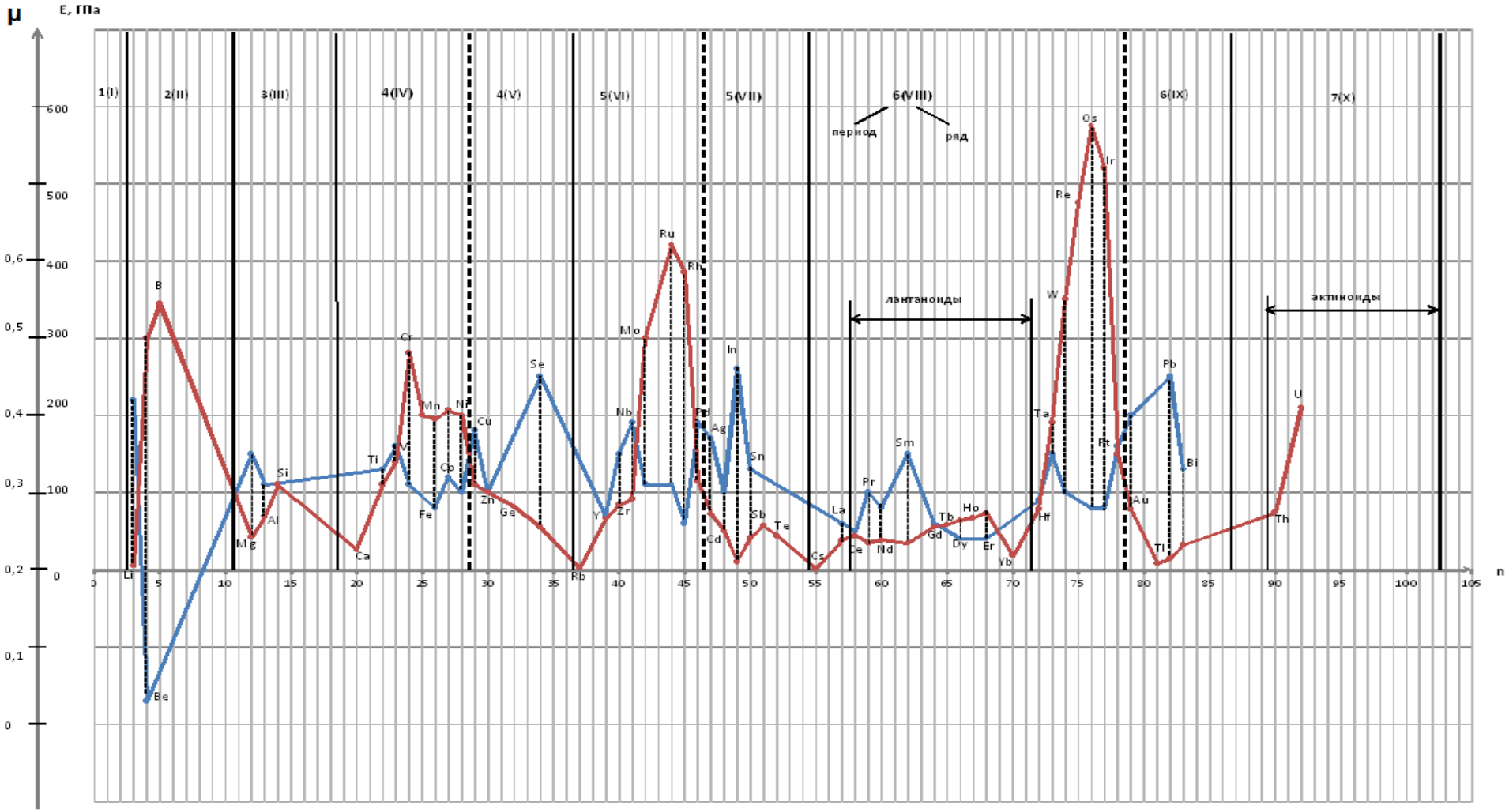


Рисунок 2.6 – Зависимости E(n) и μ(n) для металлов

В таблице 2.1 показаны сравнительные данные по E и μ для металлов и их соединений, используемых в качестве покрытий, показывают, что соединения в виде карбидов, нитридов и оксидов обладают, в сравнении с основным металлом, существенно большими значениями E и меньшими значениями μ.

Таким образом, покрытия, характеризуются значительно большими значениями E и меньшими значениями μ, чем материал металлической основы. В результате композиция «основа-покрытие» обладает большими значениями модуля упругости $E_{ИП}$ и меньшими значениями коэффициента Пуассона $\mu_{ип}$ **,** чем основа.

Следствиями принятых определений и соотношений являются выражения:

$$
\begin{cases}
k_1' = (1-x_2)\cdot k_и, \\
k_1'' = \dfrac{E_{ип}}{E_и}\cdot\dfrac{h_п}{h_и}(1-x_2)\cdot k_и, \\
k_{1э} = (1+A)(1-x_2)\cdot k_и = k_1' + k_1'', \\
k_2 = (1-x_2)\cdot k_и = k_1' \\
k_{12э} = \dfrac{k_{1э}k_2}{x_1k_{1э}+(1-x_1)k_2} = \dfrac{k_{1э}}{1+Ax_1} = \dfrac{(1+A)(1-x_2)}{1+Ax_1}\cdot k_и, \\
k_3 = x_2\cdot k_и, \\
k_э = Y_{ипs}\cdot k_и = k_{12э} + k_3,
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
Y_{ипs} = 1+\dfrac{A(1-x_1)(1-x_2)}{1+Ax_1}, \\
M_{ипs} = 1-\dfrac{A(1-x_1)(1-x_2)}{1+B(1-x_1)}
\end{cases}
$$

$$
h_п = A\cdot\frac{E_и}{E_п}h_и
$$

где $h_п$ – эффективная толщина покрытия в идеализированной модели, поскольку A – эффективный параметр.

Очевидно

при $h_п << h_и$ при $\dfrac{E_п}{E_и} >> A = \dfrac{E_{ип}}{E_и} - 1$

$E_п >> E_{ип} - E_и.$

Предельные случаи для $Y_{ипs}$ и $M_{ипs}$

$x_1 = x_2 = 1$ ↙ ↘

Отсутствие покрытия:

(достаточно только $x_1=1$,

или только $x_2=1$),

$$\begin{cases} Y_{ипs} = \dfrac{E_{ипs}}{E_и} = 1, \\ M_{ипs} = \dfrac{\mu_{ипs}}{\mu_и} = 1; \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_{ипs} = E_и, \\ \mu_{ипs} = \mu_и \end{cases}$$

Сплошное покрытие:

$x_1 = x_2 = 0,$

$$\begin{cases} Y_{ипs} = \dfrac{E_{ипs}}{E_и} = 1 + A = \dfrac{E_{ип}}{E_и}, \\ M_{ипs} = \dfrac{\mu_{ипs}}{\mu_и} = 1 - \dfrac{B}{1+B} = \dfrac{1}{1+B} = \dfrac{\mu_{ип}}{\mu_и}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_{ипs} = E_{ип}, \\ \mu_{ипs} = \mu_{ип} \end{cases}$$

Далее:

$$\begin{cases} \ell_{п1} = (1 - x_1)\cdot \ell, \\ \Delta\ell_{п1} = \dfrac{1 - x_1}{1 + Ax_1}\cdot \Delta\ell, \\ \dfrac{\Delta\ell_{п1}}{\ell_{п1}} = \dfrac{\dfrac{\Delta\ell}{\ell}}{1 + Ax_1}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \ell_{s1} = x_1 \cdot \ell, \\ \Delta\ell_{s1} = \dfrac{(1 - A)x_1}{1 + Ax_1}\cdot \Delta\ell, \\ \dfrac{\Delta\ell_{s1}}{\ell_{s1}} = \dfrac{1 + A}{1 + Ax_1}\cdot \dfrac{\Delta\ell}{\ell}; \end{cases}$$

$$\frac{\Delta\ell}{\ell} = (1 - x_1)\cdot \frac{\Delta\ell_{п1}}{\ell_{п1}} + x_1 \frac{\Delta\ell_{s1}}{\ell_{s1}};$$

$$\begin{cases} \sigma_1' = E_и \dfrac{\Delta\ell_{п1}}{\ell_{п1}} = \dfrac{E_и}{1 + Ax_1}\cdot \dfrac{\Delta\ell}{\ell}, \\ \sigma_1'' = E_п \dfrac{\Delta\ell_{п1}}{\ell_{п1}} = \dfrac{E_п}{1 + Ax_1}\cdot \dfrac{\Delta\ell}{\ell} = \dfrac{\dfrac{h_и}{h_п} AE_и}{1 + Ax_1}\cdot \dfrac{\Delta\ell}{\ell}, \\ \sigma_{1э} = E_{ип} \dfrac{\Delta\ell_{п1}}{\ell_{п1}} = \dfrac{E_{ип}}{1 + Ax_1}\cdot \dfrac{\Delta\ell}{\ell} = \sigma_1' + \dfrac{h_п}{h_и}\cdot \sigma_1'' = \dfrac{(1 + A)E_и}{1 + Ax_1}\cdot \dfrac{\Delta\ell}{\ell}, \\ \sigma_2 = \sigma_{12э} = \sigma_{1э} \\ \sigma_3 = E_и \cdot \dfrac{\Delta\ell}{\ell}, \\ \sigma_э = \dfrac{k_э}{S}\cdot \dfrac{\Delta\ell}{\ell} = \dfrac{k_{12э} + k_3}{S}\cdot \dfrac{\Delta\ell}{\ell} = (1 - x_2)\sigma_{12э} + x_2\sigma_3 = Y_{ипs} E_и \cdot \dfrac{\Delta\ell}{\ell} = E_{ипs}\cdot \dfrac{\Delta\ell}{\ell}. \end{cases}$$

Входящий в состав элементарной ячейки параллелепипед №1 с поверхностным покрытием характеризуется относительной продольной деформацией $\Delta l_{П1}/l_{П1}$, меньшей при $x_1 \neq 0$ и $A \neq 0$, чем относительная продольная деформация элементарной ячейки $\frac{\Delta\ell}{\ell}$:

$$\frac{\Delta\ell_{П1}}{\ell_{П1}} = \frac{\frac{\Delta\ell}{\ell}}{1+Ax_1} \leq \frac{\Delta\ell}{\ell}.$$

Соответственно деформация $\Delta l_{П1}/l_{П1}$, учитывая допущения рассматриваемой идеализированной модели, относится и непосредственно к самому поверхностному покрытию, т.е. к напряжению $\sigma_{пs}$, которое действовало бы в образце со сплошным покрытием $\sigma_{ип}$, если бы его относительная деформация равнялась относительной деформации локальной области $\frac{\Delta\ell_{П1}}{\ell_{П1}}$ покрытия при локальном оксидировании $\sigma_{ипs}$, где:

$$\sigma_{пs} = \sigma_1'' \quad \text{и} \quad \sigma_п = \sigma_1'' \mid x_1 = 0,$$

связаны отношением:

$$\frac{\sigma_{пs}}{\sigma_п} = \frac{\frac{\Delta\ell_{П1}}{\ell_{П1}}}{\frac{\Delta\ell}{\ell}} = \frac{1}{1+Ax_1},$$

т.е.

$$\sigma_{пs} = \frac{\sigma_п}{1+Ax_1} = \sigma_п\left(1-\frac{Ax_1}{1+Ax_1}\right) \leq \sigma_п,$$

а снижение $\sigma_{пS}$ сравнительно с $\sigma_П$ связано с увеличением долговечности покрытия.

Отметим, что с точки зрения деформаций элементарной ячейки случаи с $x_1 = 1$ или с $x_2 = 1$, обычно подразумевающие полное отсутствие покрытия, могут быть интерпретированы и как наличие бесконечно узких поперечных (при $x_1 = 1$) или при продольных (при $x_2 = 1$) полос покрытия, характеризуемых тем не менее конечными относительными деформациями. Например, при $x_1 = 1$ имеем:

$l_{П1} = 0$, $l_{s1} = l$;

$\Delta l_{П1} = 0$, $\Delta l_{s1} = \Delta l$.

$$\frac{\Delta\ell_{П1}}{\ell_{П1}} = \frac{\frac{\Delta\ell}{\ell}}{1+A} = \frac{E_и}{E_{ип}}\frac{\Delta\ell}{\ell}, \quad \frac{\Delta\ell_{s1}}{\ell_{s1}} = \frac{\Delta\ell}{\ell},$$

С математической точки зрения случай, когда отношение двух бесконечно малых ($\Delta l_{п1}$ и $l_{п1}$) является конечным числом, довольно обычен.

Параллелепипед №1 в случае $x_1 = 1$ вырождается в бесконечно тонкий слой у основания элементарной ячейки, а растягивающие напряжения принимают вид:

$$\sigma_1' = \frac{E_и}{1+A} \cdot \frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{E_и^2}{E_{ип}} \cdot \frac{\Delta \ell}{\ell},$$

$$\sigma_1'' = \frac{E_п}{1+A} \cdot \frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{E_п E_и}{E_{ип}} \cdot \frac{\Delta \ell}{\ell},$$

$$\sigma_{1э} = \sigma_2 = \sigma_{12э} = \sigma_3 = \sigma_э = E_и \frac{\Delta \ell}{\ell},$$

Сопоставление сплошного покрытия и дискретного оксидного слоя с точки зрения действующих на них растягивающих напряжений при одинаковом значении эффективного напряжения $\sigma_э$ (при одинаковой величине сторонней растягивающей силы P, поскольку $\sigma_э = \frac{p}{S} = \frac{P}{n_2 S} = \frac{P}{n_2 \ell \cdot h_и} = \frac{P}{H_и h_и}$) приводит к ситуации противоположной той, которая имела место сопоставления при одинаковой величине $\Delta l/l$: при $x_1 \neq 1$, $x_2 \neq 0$ и $A \neq 0$ растягивающие напряжения для локального покрытия превышают растягивающие напряжения для сплошного покрытия. Действительно:

$\sigma_э$

Сплошное покрытие:

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{\sigma_э}{E_{ип}},$$

$$\downarrow$$

$$\frac{\Delta \ell_{п1}}{\ell_{п1}} = \frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{\sigma_э}{E_{ип}},$$

$$\downarrow$$

$$\sigma_п = E_п \frac{\Delta \ell_{п1}}{\ell_{п1}} = \frac{E_п}{E_{ип}} \cdot \sigma_э.$$

Дискретный оксидный слой:

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{\sigma_э}{E_{ип}} = \frac{1+A}{Y_{ипs}} \cdot \frac{\sigma_э}{E_{ип}},$$

$$\downarrow$$

$$\frac{\Delta \ell_{п1}}{\ell_{п1}} = \frac{\frac{\Delta \ell}{\ell}}{1+Ax_1} = \frac{1+A}{(1+Ax_1)Y_{ипs}} \cdot \frac{\sigma_э}{E_{ип}} =$$

$$= \frac{1}{1-\frac{A}{1+A}x_2(1-x_1)} \frac{\sigma_э}{E_{ип}},$$

$$\downarrow$$

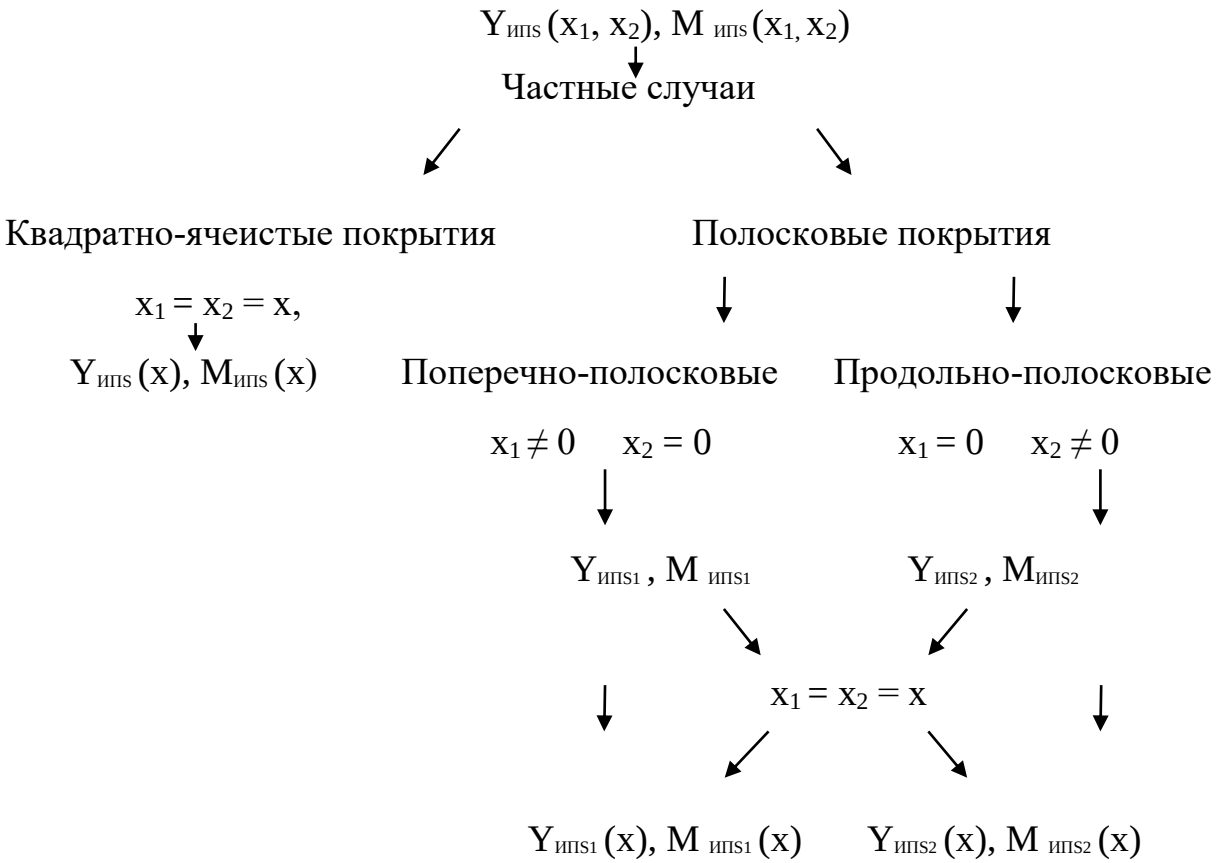
$$\sigma_{пs} = E_п \frac{\Delta \ell_{п1}}{\ell_{п1}} = \frac{\sigma_п}{1-\frac{A}{1+A}x_2(1-x_1)} \geq \sigma_n.$$

Процесс формирования покрытия приводит к появлению в нем больших остаточных напряжений, которые увеличиваются по мере роста толщины покрытия и снижают его прочность [57]. Именно эти напряжения являются причиной разрушения большинства покрытий.

Известны технологические приемы, позволяющие регулировать остаточные напряжения в покрытиях, а, следовательно, и их прочность, например путем снижения модуля упругости покрытия введением в покрытие добавок пластического материала, которые способствуют релаксации напряжений в покрытии вследствие пластической деформации [57].

Поскольку структура покрытия играет большую роль в снижении остаточных напряжений, то, в частности, желательно создать структуру покрытий, имеющих мягкие прослойки. Такого рода подвижные кристаллические структуры имеют низкие модули упругости и сдвига, что способствует релаксации напряжений. К такому типу относится и диффузионный дискретный оксидный слой.

Схематично условная классификация покрытий, с точки зрения рассмотренной теоретической модели, может быть представлена в виде:



На этой схеме:

$$\begin{cases} Y_{\text{ипs}}(x_1, x_2) = 1 + \dfrac{A(1-x_1)(1-x_2)}{1+Ax_1}, \\ M_{\text{ипs}}(x_1, x_2) = 1 - \dfrac{B(1-x_1)(1-x_2)}{1+B(1-x_1)}; \end{cases} \qquad \begin{cases} Y_{\text{ипs}}(x) = 1 + \dfrac{A(1-x)^2}{1+Ax}, \\ M_{\text{ипs}}(x_1, x_2) = 1 - \dfrac{B(1-x_1)(1-x_2)}{1+B(1-x_1)}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} Y_{\text{ипs1}} = 1 + \dfrac{A(1-x_1)}{1+Ax_1}, \\ M_{\text{ипs1}} = 1 - \dfrac{B(1-x_1)}{1+B(1-x_1)}; \end{cases} \qquad \begin{cases} Y_{\text{ипs1}} = 1 + \dfrac{A(1-x)}{1+Ax}, \\ M_{\text{ипs1}} = 1 - \dfrac{B(1-x)}{1+B(1-x)}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} Y_{\text{ипs2}} = 1 + A(1-x_2), \\ M_{\text{ипs2}} = 1 - \dfrac{B}{1+B}(1-x_2); \end{cases} \qquad \begin{cases} Y_{\text{ипs2}} = 1 + A(1-x_2), \\ M_{\text{ипs2}}(x) = 1 - \dfrac{B}{1+B}(1-x); \end{cases}$$

Примеры зависимостей $Y_{\text{ипs}}(x)$, $Y_{\text{ипs1}}(x)$ и $Y_{\text{ипs2}}(x)$ численно представлены в таблице 2.4 и графически на рисунке 2.7.

Таблица 2.4 – Численное представление зависимостей $Y_{\text{ипs}}(x)$, $Y_{\text{ипs1}}(x)$ и $Y_{\text{ипs2}}(x)$ для значений параметра A = 3; 7

x		0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
A=3	$Y_{\text{ипs}}$	4,0	3,354	2,869	2,200	1,774	1,491	1,300	1,171	1,087	1,035	1,008	1,0
	$Y_{\text{ипs1}}$	4,0	3,478	3,077	2,500	2,105	1,818	1,600	1,429	1,290	1,176	1,081	1,0
	$Y_{\text{ипs2}}$	4,0	3,850	3,700	3,400	3,100	2,800	2,500	2,200	1,900	1,600	1,300	1,0
A=7	$Y_{\text{ипs}}$	8,0	5,680	4,335	2,867	2,106	1,663	1,389	1,215	1,107	1,042	1,010	1,0
	$Y_{\text{ипs1}}$	8,0	5,714	4,706	3,333	2,581	2,105	1,778	1,538	1,356	1,212	1,096	1,0
	$Y_{\text{ипs2}}$	8,0	7,650	7,300	6,600	5,900	5,200	4,500	3,800	3,100	2,400	1,700	1,0

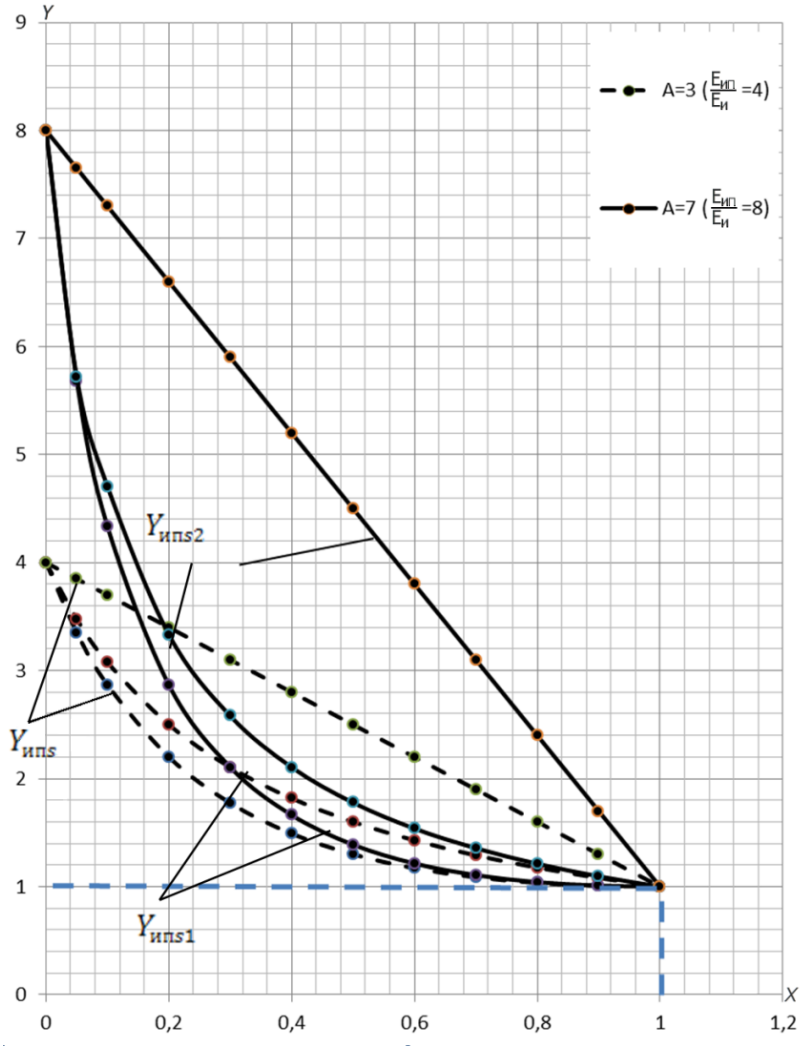


Рисунок 2.7 – Графики зависимостей $Y_{ипS}(x)$, $Y_{ипS1}(x)$ и $Y_{ипS2}(x)$ для A = 3; 7

Дополнительно на рис. 2.8 и в таблице 2.5 представлены зависимости $Y_{ипS}(x)$ для A =0,1; 0,2 и $M_{ипS}(x)$ для B = 0,1; 0,2 влияющих на локальное покрытие для параметра характеризующего модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Таблица 2.5 – Численное представление зависимостей $Y_{ипS}(x)$ для A =0,1; 0,2 и $M_{ипS}(x)$ для B = 0,1; 0,2

	X	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
A=B=0,1	$Y_{ипS}$	1,1	1,08	1,063	1,048	1,035	1,024	1,015	1,008	1,004	1,001	1
	$M_{ипS}$	0,909	0,926	0,941	0,954	0,966	0,976	0,985	0,991	0,996	0,999	1
A=B=0,2	$Y_{ипS}$	1,2	1,159	1,123	1,092	1,067	1,045	1,029	1,016	1,007	1,002	1
	$M_{ипS}$	0,833	0,863	0,89	0,914	0,936	0,955	0,97	0,983	0,992	0,998	1

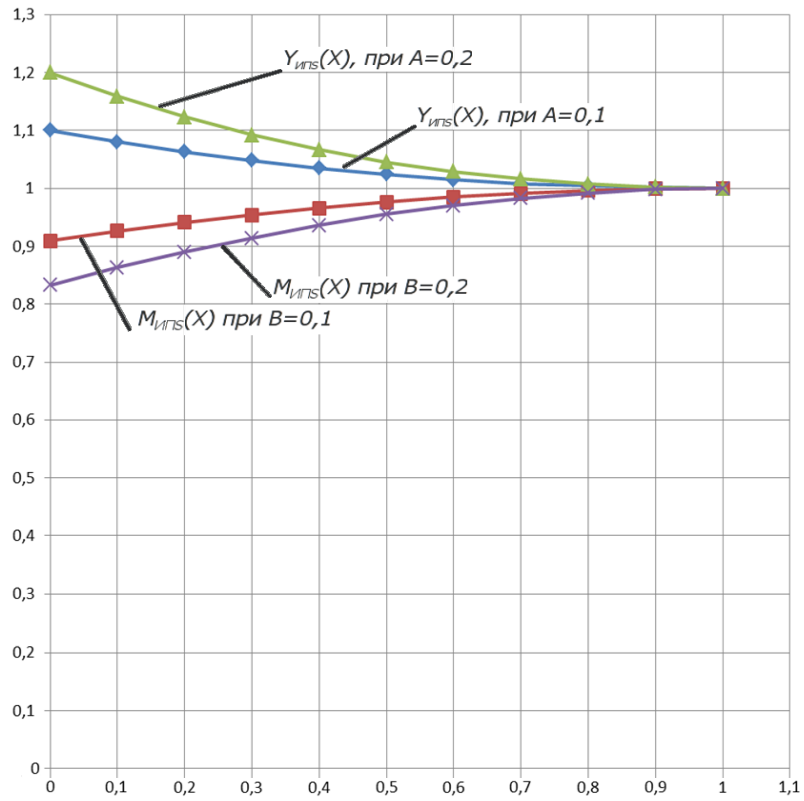


Рисунок 2.8 – Графики зависимостей $Y_{ИПС}(x)$ для A =0,1; 0,2 и $M_{ИПС}(x)$ для B =0,1; 0,2

Согласно использованной концепции двухпредельности приведенные зависимости в абсолютных значениях демонстрируют тенденции изменений модуля Юнга (уменьшение) и коэффициента Пуассона (увеличение) для перехода от сплошного покрытия при x = 0 к полному отсутствию покрытия при x = 1:

$$
\begin{cases}
Y_{ИПС}(x=0) = Y_{ИПС1}(x=0) = Y_{ИПС2}(x=0) = 1 + A = \dfrac{E_{ИП}}{E_{И}}, \\
Y_{ИПС}(x=1) = Y_{ИПС1}(x=1) = Y_{ИПС2}(x=1) = 1; \\
\downarrow \\
E_{ИПС}(x=0) = E_{ИПС1}(x=0) = E_{ИПС2}(x=0) = E_{ИП}, \\
E_{ИПС}(x=1) = E_{ИПС1}(x=1) = E_{ИПС2}(x=1) = E_{И}; \\
M_{ИПС}(x=0) = M_{ИПС1}(x=0) = M_{ИПС2}(x=0) = \dfrac{1}{1+B} = \dfrac{\mu_{ИП}}{\mu_{И}}, \\
M_{ИПС}(x=1) = M_{ИПС1}(x=1) = M_{ИПС2}(x=1) = 1; \\
\downarrow \\
\mu_{ИПС}(x=0) = \mu_{ИПС1}(x=0) = \mu_{ИПС2}(x=0) = \mu_{ИП}, \\
\mu_{ИПС}(x=1) = \mu_{ИПС1}(x=1) = \mu_{ИПС2}(x=1) = \mu_{И}
\end{cases}
$$

Отметим, что использование полосковых покрытий приводит к возможности распространения трещин вдоль полос.

2.2 Теоретические предпосылки формирования дискретного диффузионного упрочнения на рабочие поверхности инструмента

Известно, что хрупкое разрушение рабочей части режущего инструмента, происходящее в отсутствии сколь-нибудь заметного остаточного деформирования, является наиболее частым случаем его отказа [1]. Таким образом, время непрерывной работы инструмента до отказа вследствие хрупкого разрушения, характеризует его долговечность в заданном режиме обработки. С точки зрения кинетической концепции разрушения, акцентирующей внимание на влияние временного фактора на прочность, долговечность служит одной из важнейших прочностных характеристик материала (но не изделия в целом с учетом всех его конструкционных особенностей). Однако для режущего инструмента его прочностные характеристики находятся в прямой зависимости от прочностных характеристик материала, в том числе от долговечности, определяемой формулой Журкова – базовой формуле кинетической теории прочности [51]. В этой связи, в качестве альтернативного примера, отметим использование понятия долговечности как одного из критериев прочности на уровне чистой феноменологии, без обращения к формуле Журкова, в отношении покрытий на контактных площадках режущего инструмента и ее экспериментальную оценку в работе [1].

Вместе с тем рассмотрение диффузионного упрочнения в качестве объемного модификатора свойств инструментального материала [1] позволяет использовать «материаловедческий» подход к композиции ячеистого упрочнения с основой и формулу Журкова для теоретической оценки тенденций влияния ячеистости упрочнения на долговечность образцов, что сказано во второй главе. Прочностные свойства материала и изготовленного из него изделия являются хотя и связанными, но отнюдь не тождественными понятиями. По этой причине формула Журкова, характеризующая прочностные свойства материала, не содержит каких-либо

указаний касательно способов учета влияния на энергию активации (процесса разрушения) и соответствующий ей активационный объем конструктивных особенностей изделия, масштабного эффекта, а также влияния агрессивной среды (в том числе формируемой процессом резания).

Объединение «материаловедческого» подхода, влияния сплошного покрытия на эффективные упругие свойства его композиции с основой, со структурными особенностями ячеистой композиции позволило, на уровне теоретической модели, показать снижение напряжений, действующих на локальные зоны с покрытием, увеличивающие их долговечность. За счет ячеистости, основа, обретает способность «дышать», что улучшает ее прочностные свойства и предполагает наличие возможности экстраполяции тенденций положительного влияния локальности (ячеистости) покрытия на режущий инструмент [51].

Использование более сложных теоретических моделей и расчетов на их основе, с целью последующего сопоставления с результатами эксплуатационных проверок на реальном режущем инструменте, не представляется целесообразным, по крайней мере, на существующем уровне развития кинетических представлений о прочности. В качестве обоснования такого заключения отметим три его предпосылки:

– многие неясности в концепциях кинетической теории прочности (начиная с отсутствия теоретического вывода основного уравнения этой теории из модельных представлений, одинаковой математической формулы для оценки времени ожидания флуктуации с энергией, достаточной для разрушения в микроскопическом масштабе и для разрушения микроскопического тела) [52];

– даже в отношении образцов «долговечности одинаковых образцов, испытываемых при одном и том же напряжении при идентичных условиях, могут различаться до 100 раз» [51];

– отсутствие убедительного способа согласования статистических реалий эксперимента, более описываемых формализмом Вейбулла, с детерминистским подходом в определении долговечности по формуле Журкова.

Использование в работе формализма простейшей теоретической модели явилось исходным пунктом качественного обоснования прочностной целесообразности ячеистого структурирования диффузионного покрытия в виде упорядоченной совокупности локальных областей с покрытием, отделенных друг от друга структурой ячеистого типа без покрытия. Это обеспечивает подвижность локальных зон с диффузионным покрытием в условиях деформационных изменений и снижает эффективный модуль упругости для композиции такого покрытия с основой, при сохранении прочности диффузионного сцепления с ней, сравнительно со случаем сплошного покрытия основы. В свою очередь снижение эффективного модуля упругости способствует облегчению условий релаксации напряжений [1].

Геометрические особенности поверхностного рельефа композиции обуславливают соответствующие неоднородности деформационных изменений, а сами границы локальных областей с покрытием выступают в роли препятствий для поверхностного распространения трещин, образующихся в покрытии в ходе эксплуатации режущего инструмента. Кроме того, увеличение жесткости инструмента за счет нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя, в сочетании с сопутствующим сохранением запаса пластических свойств за счет его ячеистости, снижает склонность режущей части инструмента к потере формоустойчивости и упругим прогибам при приложении термомеханических напряжений, возникающих в процессе резания. Также локальность частично компенсирует разницу коэффициентов термического расширения между покрытием и основой.

С учетом вышесказанного использование дискретного оксидного слоя можно рассматривать в качестве эффективного метода повышения долговечности режущего инструмента и деталей.

Взаимосвязь свойств ячеистого упрочнения на инструментальном материале, условий эксплуатации режущего инструмента и причин его отказов в процессе эксплуатации позволяет сформулировать рабочие предложения по направленной модификации свойств инструментального

материала для повышения работоспособности инструмента, которые заключаются в:

– разработке принципов формирования диффузионного дискретного оксидного слоя на режущем инструменте и рабочих поверхностях деталей;

– разработке технологии формирования дискретного оксидного слоя;

– повышении усталостного сопротивления инструментального материала за счет ячеистого диффузионного упрочнения.

С учетом различия уровня термомеханического воздействия на контактную площадку режущего инструмента в зависимости от условий его эксплуатации, отказы сильно различаются. Систематизация видов отказа, например, для быстрорежущего инструмента вынесена в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Классификация инструментов из быстрорежущей стали по условиям эксплуатации и видам отказа для выбора технологии упрочнения

Условия эксплуатации инструмента	Характер нагружения, вид отказа инструмента	Особенности режущего инструмента	Типичные представители инструмента, классификации групп
1	2	3	4
Область 1 (txs) ≤ 1,5-2мм^2; V ≤ 20 м/мин.	Низкие значения термомеханических нагрузок (Pz≤1000Н, T≤200 ^{0}C), отсутствие упругопластических прогибов режущего клина инструмента, отказы вследствие абразивного и адгезионного изнашивания.	Повышение твердости и снижение ее адгезионной активности путем дополнительной обработки.	Резьбонарезной инструмент (метчики, плашки). Чистовые зенкеры, развертки, протяжки, шевера. Группа I.
Область 2. (txs)≤ 3-5мм^2; V≤ 20 м/мин.	Среднее значения термомеханических нагрузок ($P_z \leq$ 3000Н, T ≤ 250°C). Слабые упругопластические прогибы режущего клина инструмента, отказы вследствии абразивного и адгезионного изнашивания.	Повышение твердости при росте ее адгезионной активности по отношению к инструментальному материалу.	Фасонные резцы, зуборезные долбяки, протяжки. Группа I и II.
Область 3. (txs)>5 мм^2; V≤ 20 м/мин.	Повышение напряжения при среднем термическом нагружении (Pz > 3000Н; T $\cong$ 250 - 300°C) склонность к выраженным упругопластическим прогибам режущего клина инструмента, приводящие к хрупкому разрушению режущего клина инструмента.	Применение режущего инструмента эффекта не имеет.	Отрезные резцы, сверла, п/ч зенкеры. фасонные резцы. Группа II.

Продолжение таблицы 2.6

1	2	3	4
Область 4. (txs)≤ 0,1-2мм^2; V≤40 м/мин.	Среднее значение термомеханических нагрузок (Pz ≤ 1000Н, T ≤ 400 ^{0}C), неустойчивое наростообразование, выраженные адгезионные усталостные процессы. Адгезионно-усталостное изнашивание с формированием фронта подповерхностных трещин, слабые упруго-пластические прогибы режущего клина инструмента.	Повышение сопротивляемости усталостному разрушению. Формирование зоны повышенной трещиностойкости.	Концевые фрезы, фасонные трехсторонние и модульные фрезы, сверла, РИ для обработки зубчатых колес методом зуботочения, долбяки. Группа I и II.
Область 5. (txs) ≤3 - 5мм^2. V≤40 м/мин.	Средние значения термомеханических нагрузок (Pz≤1000Н, T≤400-450°C), устойчивое наростообразование. Адгезионное, адгезионно-усталостное изнашивание с формированием подповерхностных трещин. Упругопластические прогибы режущего инструмента.	Повышение сопротивляемости усталостному разрушению. Формирование зоны повышенной трещиностойкости.	Отрезные и фасонные резцы, сверла, концевые фрезы, пазовые трехсторонние фрезы, фрезы для резьбофрезерования, червячные фрезы. Группа I и II.
Область 6. (txs)>5,0 мм^2. V≤400 м/мин.	Высокие термомеханические нагрузки (Pz > 3000 Н, T>450°C) с высокой вероятностью пластического разрушения режущего клина инструмента. Отказы вследствие процессов ползучести и динамической рекристаллизации режущего клина инструмента, которые приводят к высокой вероятности пластического разрушения режущего инструмента.	Ограничение за счет хрупкой прочности режущего клина инструмента.	Отрезные резцы, сверла с Dсв>20 мм. Группа II.
Область 7. (txs)≤ 0,1-2мм^2. V>40м/мин.	Высокие термомеханические нагрузки (Pz ≤ 1000Н, T>500°C). Адгезионный износ с высокой вероятностью пластического разрушения режущего клина инструмента вследствие процессов ползучести и динамической рекристаллизации.	Повышение сопротивляемости разрушению, в условиях выраженных пластических деформациях режущего клина инструмента, необходимо формирование термостабилизируемой зоны большей глубины при сохранении уровня прочности режущего клина инструмента.	Отрезные резцы, сверла, высокоскоростные червячные фрезы, режущий инструмент для нарезания конических колес. Группа I и II.

Продолжение таблицы 2.6

1	2	3	4
Область 8. (txs)≤3-5мм^2; V>40м/мин	Высокие термомеханические нагрузки (Pz ≤3000Н, T>500ºС). Интенсивные процессы ползучести вследствие процессов динамической рекристаллизации стали в пределах режущего клина инструмента Отказы из-за пластического разрушения режущего клина инструмента.	” - “	Сверла, концевые фрезы, отрезные резцы. Группа II.
Область 9. (txs)>5,0 мм^2; V>40 м/мин.	Экстремальные термомеханические нагрузки (Pz ≤ 3000Н, T > 500ºС). Отказы следствие пластического разрушения режущего клина инструмента.	Применение режущего инструмента эффекта не имеет.	Сверла, концевые фрезы, отрезные резцы. Группа II.

Обзор данных таблицы 2.6 показывает, что имеются ограничения на возможности использования быстрорежущего инструмента в условиях экстремального термомеханического нагружения режущего клина инструмента, (см. таблицу 2.6 области 3, 6, 9). Например, в указанных областях хрупкое разрушение режущего клина инструмента происходит либо вследствие недостаточной хрупкой прочности при экстремальных значениях действующих напряжений, либо связаны с явлением ползучести, динамической рекристаллизации и формирования фронта подповерхностных трещин. В последнем случае сохраняются некоторые возможности инструментального материала сопротивляться ползучести при росте термомеханических нагрузок. Для областей 1, 4, 7 напротив возможности повышения сопротивляемости выше.

В частности, в условиях резкого увеличения термомеханических нагрузок на режущие кромки инструмента чрезвычайно важно предельно уменьшить вероятность разупрочнения инструментального материала в пределах контактных зон.

При использовании режущего инструмента и деталей с дискретным оксидным слоем предъявляются особые требования к условиям обработки, станочному оборудованию, конструкции режущего инструмента, его

геометрии. Наиболее эффективно режущий инструмент с дискретным оксидным слоем работает в условиях, минимизирующих или исключающих наростообразование, а также при скоростях резания, снижающих интенсивность адгезионно-усталостных процессов.

Одним из направлений повышения работоспособности покрытий для режущего инструмента и деталей является применение диффузионного дискретного оксидного слоя, (см. рисунок 2.9 и 2.10).

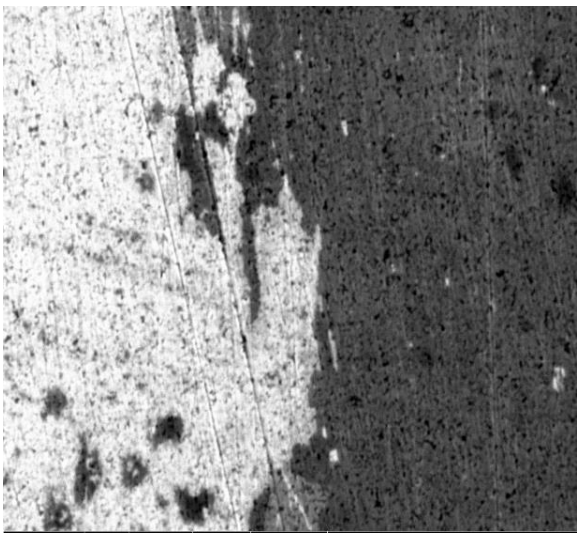


Рисунок 2.9 – Принципиальная схема структуры дискретного оксидного слоя

Рисунок 2.10 – упорядоченная совокупность локальных зон на передней поверхности.

В соответствии с таким подходом, в работе сформулированы положения о повышении долговечности режущего инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем при сохранении запаса пластичности инструмента, согласно которым диффузионный 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 оксидного слоя на контактных площадках режущего инструмента, позволяет сформулировать их в виде следующих рабочих гипотез:

1. Диффузионный 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 локальным покрытием, что снижает риск хрупкого разрушения режущего клина инструмента при действии циклических нагрузок.

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

На основе указанного подхода была сформулирована методика формирования диффузионного дискретного оксидного слоя, разработано оборудование и технология.

Технология формирования диффузионного дискретного оксидного слоя на поверхности материала происходит за счет активации элементов потока сжатого воздуха, проходящих через область коронного разряда при атмосферном давлении. При этом, в своей основе, состав оксидного слоя определяется параметрами так называемой стандартной атмосферы на уровне моря, для которой приняты [58] стандартное барометрическое давление воздуха p_c = 760 мм рт. ст. = 101325 Па, стандартная температура T_c = 288,15 К, стандартная концентрация $n_c = 25{,}471 \cdot 10^{24}$ м$^{-3}$, стандартная плотность ρ_c = 1,225 кг/м^3 при молярной массе воздуха μ_c = 28,96442 кг/кмоль и его примерном составе, включающем: N_2 (78,084%), O_2 (20,947%), Ar (0,934%), CO_2 (0,034%), Ne ($1{,}818 \cdot 10^{-3}$ %), He ($5{,}24 \cdot 10^{-4}$ %), CH_4 ($2 \cdot 10^{-4}$ %), Kr ($1{,}14 \cdot 10^{-4}$ %), H_2 ($5 \cdot 10^{-5}$ %), Xe ($8{,}7 \cdot 10^{-6}$%), O_3 ($(2 \div 7) \cdot 10^{-6}$ %).

Наличие в воздухе молекулярных компонентов азота, кислорода и соединений углерода позволяет говорить о возможности вхождения в состав покрытия нитридов, оксидов и карбидов. Композиции образуются при взаимодействии с покрываемым материалом положительно или отрицательно заряженных ионов N_2^+, N^+, $O_2^{\pm}$, $O^{\pm}$, $CO_2^{\pm}$, $CO^{\pm}$ и др. На рисунке 2.11 приведена ожидаемая принципиальная схема диффузионного покрытия, получаемого воздействием активированного воздушного потока на основу, с условно выделенными границами послойной диффузионной самоорганизации и указанием требований, предъявляемых к слоям.

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. табл.2.7). Диффузионный оксидный слой способствует росту запаса пластичности инструмента и жесткости инструментального материала, что, в свою очередь, снижает склонность режущего клина инструмента к потере формоустойчивости и упругим прогибам под воздействием термомеханических напряжений, возникающих при резании и, таким образом, снижает вероятность хрупкого разрушения покрытия.

Таблица 2.7 - Предполагаемые слои дискретного оксидирования

Наименование слоя	Рекомендуемые композиции
Верхний	Оксидные соединения MeO-O_2: Fe_xO(x~0,84-0,96), Fe_2O_3;Fe_3O_4;WO_2(δ); Co_3O_4(II,III), CoO(II);$WO_{2,90}$; $WO_{2,72}$;TiO,Ti_2O и др.
Промежуточный	Соединения Me-MeO: W-W_xO_{3n-2}, Co-Co_xO_{3n-2}, Ti-Ti_xO_{3n-2}, Fe-Fe_xO_{3n-2} и др.
Нижний	Упрочняющие фазы FeO(α); WO_3(α); WO_3(β), WO_3(γ), TiO(α), и др.

Диффузионный оксидный слой повышает сопротивляемость усталостному разрушению, особенно в условиях повышенных контактных напряжений и циклического нагружения режущей части инструмента (операции прерывистого резания), обеспечивает совместимость с

инструментальным материалом, сохраняя при этом прочность инструментального материала.

Разработанная для этой технологии экспериментальная установка имеет униполярную положительную корону. Количество положительных ионов, порождаемых ионизацией атмосферных компонентов, обычно существенно превышает количество отрицательных ионов (доминирующая азотная компонента вообще 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. Так называемый чехол коронного разряда, ограниченный областью лавинных процессов, непосредственно примыкающей к вершине игольчатого электрода, содержит носители заряда обоих знаков, тогда как дрейфовая область положительной короны, располагаемая за чехлом, доступна лишь для положительных ионов, пространственный заряд которых выполняет функцию регулятора процесса их поступления в эту область [59, 60].

На рисунке 2.11 представлена принципиальная электрическая схема разрядного промежутка с положительно коронирующим игольчатым электродом. 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 характеризуемому наличием сильного поля.

$I(x) = I^-(x) + I^+(x) = I^-(0) = I^+(d) = I;$

$I^-(x) = I_e(x) + I_i^-(x) \approx I_e(x);$

$I_i^-(x) \ll I_e(x);\ I^-(d) = I^+(0) = 0.$

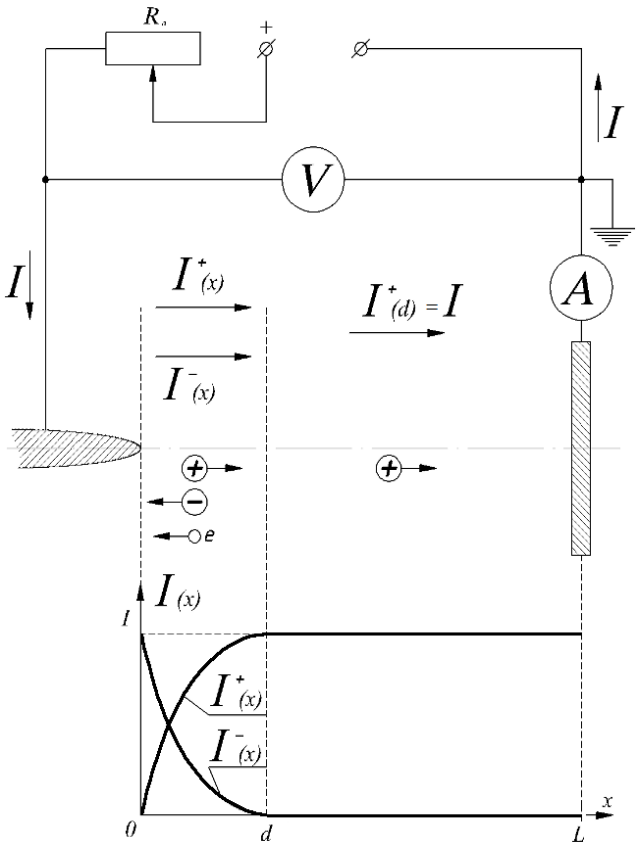


Рисунок 2.11 – Принципиальная электрическая схема разрядного промежутка с положительно коронирующим игольчатым электродом

Вольт – амперная характеристика коронирующего разрядного промежутка, изображенного на рисунке 2.11, приближенно следует аналитической зависимости вида [59].

$$I = \alpha \cdot \frac{V(V-V_K)}{L^2} = \alpha \cdot (1 - \frac{V_K}{V}) \cdot I_0, \quad (2.1)$$

$$I_0 = (\frac{V}{L})^2 \text{ мкА, L [мм]} \quad (2.2)$$

где: V, V_K – соответственно напряжение на разрядном промежутке и напряжение зажигания короны, кВ; α – экспериментально определяемый безразмерный коэффициент. Например, для V=15 кВ и L=10 мм получаем I_0 = 2,25 мкА, что при α = 10 ÷ 100 дает $\alpha \cdot I_0 = (22{,}5 \div 225)$мкА.

Входящая в формулу (2.1) величина V_K может быть оценена при помощи определения напряженности электрического поля E между шариком радиуса r_0 и плоскостью, удаленной от его центра на расстояние $r_0 + L$, в отсутствии коронного разряда. На нормали к плоскости, проходящей через центр шарика, при $L \gg r_0$ [59].

$$E \approx V \cdot \frac{r_0}{(r_0+x)^2}. \quad (2.3)$$

Критическая напряженность поля E_K, требующаяся для зажигания короны, достигается, прежде всего, на поверхности шарика (x=0) при $V = V_K$, т.е.

$$V_K \approx E_K \cdot r_0 \quad (2.4)$$

С другой стороны, для сферического коронирующего электрода имеет место аналог так называемой формулы Пика (критическое поле зажигания короны в воздухе между коаксиальными цилиндрами) в виде определения [59].

$$E_K = 27{,}8 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0{,}54}{\sqrt{\delta r_0}}\right) \quad (2.5)$$

где: δ – относительная плотность воздуха (отношение плотности воздуха к нормальной), пригодная для оценок в случаях острия или стержня с радиусом оконечного закругления r_0. Подстановка (2.5) в (2.4) дает оценочное выражение для V_K:

$$V_K = 27{,}8 \cdot \delta \cdot r_0 \left(1 + \frac{0{,}54}{\sqrt{\delta r_0}}\right) \text{кВ}. \quad (2.6)$$

Численные значения E_K и V_K при различных r_0, полученные с использованием формул (2.5) и (2.6) для δ = 1, приведены в таблице 2.8. Рисунок 2.12 демонстрирует графическое представление зависимостей $E_K(r_0)$ и $V_K(r_0)$ на основании численных значений из таблицы 2.8.

Таблица 2.8 – Численные значения E_K и V_K, получаемые из (2.5) и (2.6) при δ = 1, соответствующие различным значениям r_0

r_0, см	$0{,}5\cdot10^{-2}$	$1\cdot10^{-2}$	$2\cdot10^{-2}$	$3\cdot10^{-2}$	$4\cdot10^{-2}$	$5\cdot10^{-2}$	$6\cdot10^{-2}$	$7\cdot10^{-2}$	$8\cdot10^{-2}$	$9\cdot10^{-2}$	$10\cdot10^{-2}$
E_K, $\frac{\text{кВ}}{\text{см}}$	240,1	177,9	133,0	114,5	102,9	94,9	89,1	84,5	80,9	77,8	75,3
V_K, кВ	1,201	1,779	2,679	3,434	4,114	4,747	5,345	5,918	6,470	7,006	7,527

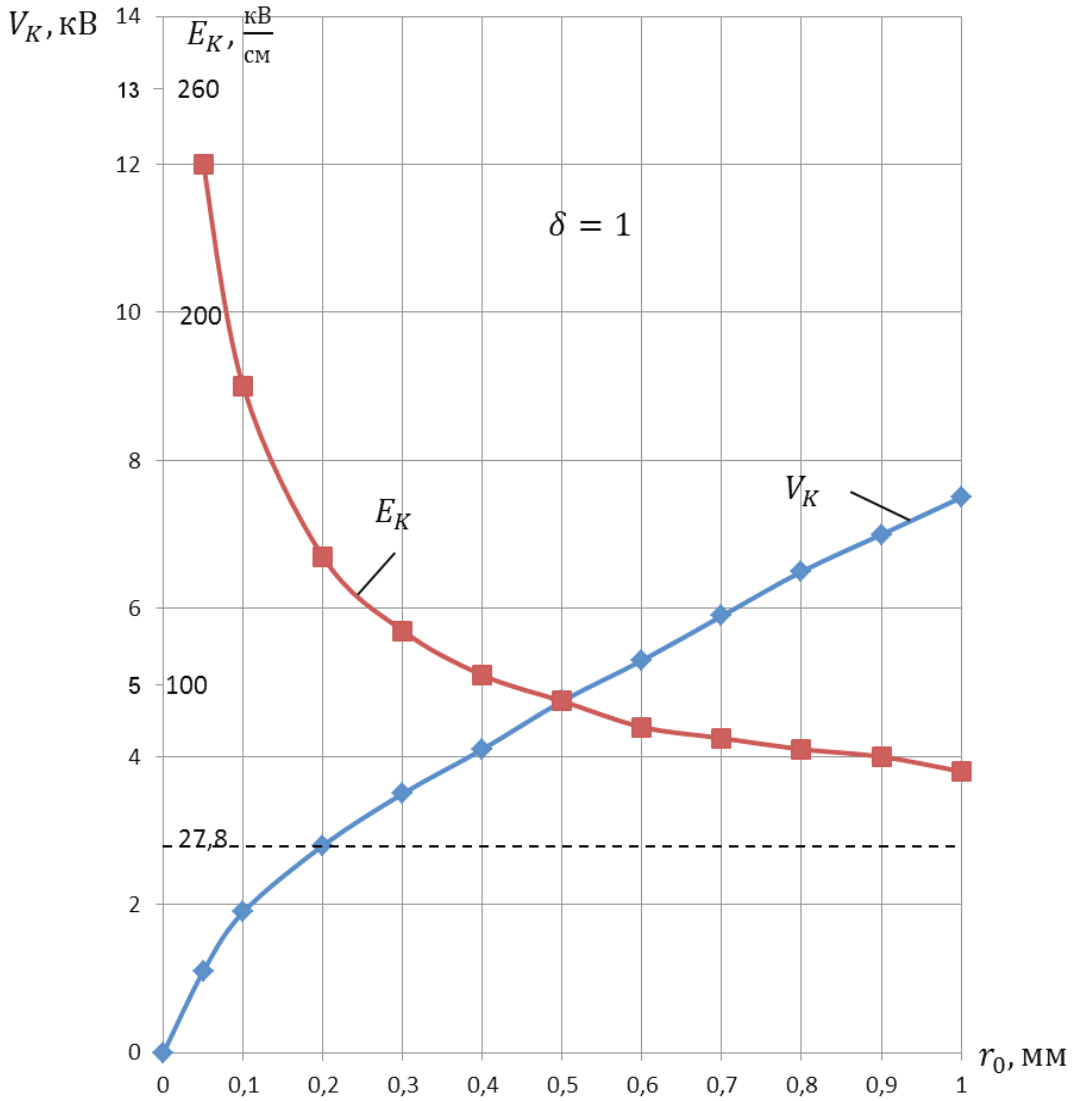


Рисунок 2.12 – Теоретические зависимости $E_K(r_0)$ и $V_K(r_0)$ для разрядного промежутка «игольчатый электрод-плоскость», построенные по формулам (3.5) и (3.6) для δ = 1

Также в качестве примеров использования формул (2.1) и (2.6) с δ = 1 для построения теоретических вольт-амперных характеристик разрядного промежутка «игольчатый электрод-плоскость» рассмотрены варианты с L= 10мм при r_0 = 0,01 см и r_0 = 0,05 см, реализуемые при значениях α = 50; 100; 200. Результаты расчетов представлены численно в таблице 2.9 и в виде графиков на рисунке 2.13.

Таблица 2.9 – Численное представление результатов расчетов вольт-амперных характеристик разрядного промежутка «игольчатый электрод-плоскость» при L = 10мм

V,кВ			1,779	3	4,747	5	6	8	10	12	15	18
I, мкА	r_0=0,01 см	α=50	0	1,83	7,04	8,05	12,66	24,88	41,11	61,33	99,16	145,99
		α=100	0	3,66	14,09	16,11	25,33	49,77	82,21	122,65	198,32	291,98
		α=200	0	7,33	28,18	32,21	50,65	99,54	164,42	245,30	396,63	583,96
	r_0=0,05 см	α=50	-	-	0	0,63	3,76	13,01	26,27	43,52	76,90	119,28
		α=100	-	-	0	1,27	7,52	26,02	52,53	87,04	153,80	238,55
		α=200	-	-	0	2,53	15,04	52,05	105,06	174,07	307,59	477,11

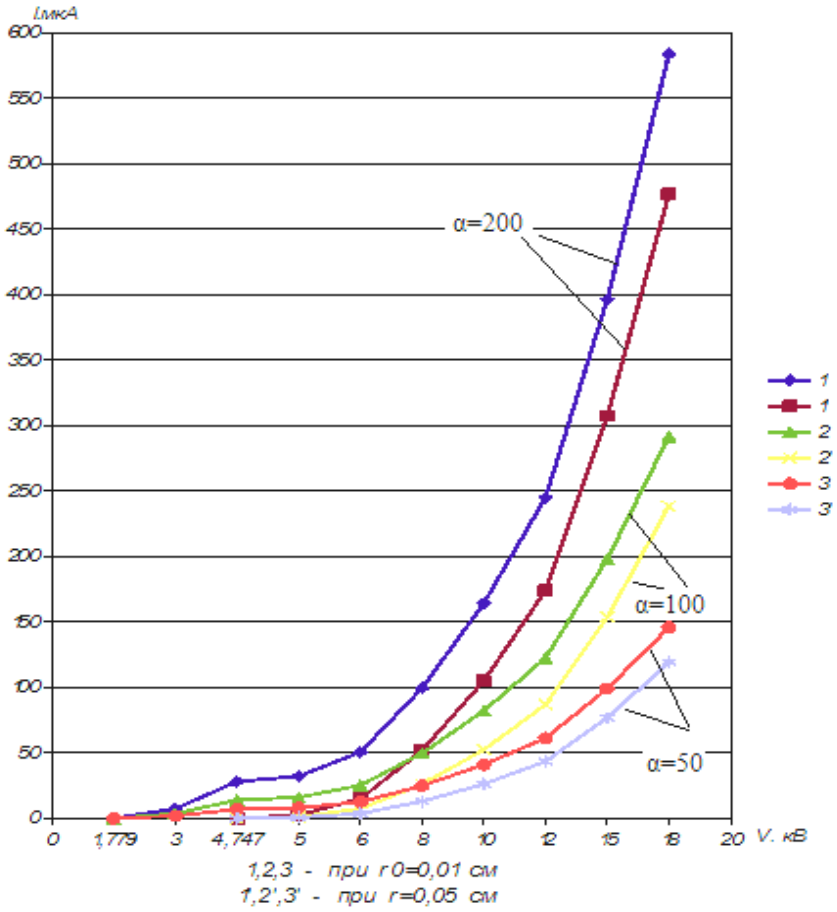


Рисунок 2.13 – Теоретические вольт-амперные характеристики разрядного промежутка «игольчатый электрод-плоскость» с использованием численных значений из таблицы 2.9

Численные значения E_K и V_K при различных r_O, полученные с использованием (2.5) и (2.6) для случая δ =1, приведены в таблице 2.8. Рисунок 2.12 демонстрирует графическое представление зависимостей $E_K(r_O)$ и $V_K(r_O)$ на основание численных значений из таблицы 2.8. Также в качестве примеров использования (2.1) и (2.6) с δ =1 для построения теоретических вольтамперных характеристик разрядного промежутка «игольчатый электрод-плоскость» рассмотрены варианты с L = 10 мм при r_O = 0,01 см, r_O = 0,05 см, реализуемые при значениях α = 50; 100; 200. Результаты расчетов представлены численно в таблице 2.9 и в виде графиков на рисунке 2.13.

Опытные данные свидетельствуют [59] о достаточной общности для различных геометрий разрядного промежутка с коронирующим на воздухе игольчатым электродом зависимости разрядного тока I от приложенного напряжения V вида:

$$I(V) \sim V \cdot (V - V_K).$$

Эта общность может быть делегирована и соотношение (2.1) при условии замены L на эффективную величину $L_{ЭФ}$, зависящую от особенностей геометрии разрядного промежутка и согласованную со значением коэффициента α, сохраняющем неизменность в некотором диапазоне изменений $L_{ЭФ}$ и r_O. Таблица 2.9, как и рисунок 2.13, дают сугубо предварительное представление, на уровне оценочной числовой конкретики, о связи тока и напряжения для различных α, r_O. В условиях отсутствия прокачки сжатого воздуха через область коронного разряда.

Ток положительной короны I, в случае отсутствия перехвата положительных ионов какими-либо сторонними электродами (например, выходной частью цилиндрического сопла с осевым расположением игольчатого электрода), характеризует количество положительных ионов n_i^+, поступающих в секунду на токовое «пятно» рабочего плоского электрода, т.е. служит характеристикой интенсивности процесса нанесения покрытия ионизированными компонентами воздушной среды. При допущении, что

каждый положительный ион является носителем элементарного заряда e = 1,6· 10^{-19} Кл.

$$n_i^+ = \frac{I}{e}$$

Например, при I = 100 мкА $n_i^+ = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 6{,}25 \cdot 10^{14} \frac{1}{c}$.

Отметим, что измеряемый ток I характеризует количество положительных ионов n_i^+ и в случае прокачки через разрядный промежуток потока сжатого воздуха. Для ориентировочной оценки количественного содержания в n_i^+ ионов различного типа воспользуемся процентным распределением молекулярного состава стандартной атмосферы. Тогда:

$n_i^+ (N_2^+) = 0{,}78 \cdot n_i^+$;

$n_i^+ (O_2^+) = 0{,}21 \cdot n_i^+$;

$n_i^+ (CO_2^+) = 0{,}34 \cdot 10^{-3} \cdot n_i^+$.

В целях максимального упрощения оценок, все многообразие процессов в газоразрядном промежутке сведено только лишь к процессам однократной ионизации молекулярных составляющих воздуха.

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. Однако в отсутствие ионной активации электроположительность доминирующей в процентном отношении азотной компоненты приводит к тому, что почти мгновенная хемосорбция электроотрицательного кислорода с образованием оксидной ленки будет препятствовать хемосорбции азота и образованию нитридов [61].

Ионная активация воздуха положительной короной игольчатого электрода увеличивает его хемосорбционную (ионносорбционную) активность, причем интенсификация процесса оксидирования приповерхностного слоя электрода будет, предположительно, сохранять за ним функцию блокировки процесса азотирования. Незначительное, сравнительно с O_2, содержание в атмосфере CO_2 также, по-видимому, не даст ощутимого вклада в состав покрытия карбидной составляющей.

Ток I газоразрядного промежутка замыкается через внешнюю цепь, где в роли его носителей выступают свободные электроны, нейтрализующие заряд положительных ионов, поступающих на покрываемый электрод. Вместе с тем оксидная блокировка процесса образования нитридов на электроде ожидаемо способствует поверхностной нейтрализации положительных ионов азота. Сопутствующее распыление нейтрализованной азотной составляющей и бомбардировочная очистка поверхности, в свою очередь, облегчает диффузию ионов (или атомов) кислорода через поверхностный слой с образованием диффузионного внутреннего покрытия оксидного типа.

Резкая 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 характеризуемому наличием сильного поля. Для оценки линейных размеров чехла вдоль оси игольчатого электрода на рисунке 2.11 воспользуемся определением (2.3) величины напряженности поля E, пренебрегая искажением поля пространственным зарядом и полагая, что на границе чехла с x = d поле уменьшается до критических значений V_K и E_K, определяемых формулами (2.4) и (2.5). Тогда

$$E_K = V \cdot \frac{r_o}{(r_o + d)^2}, \qquad (2.7)$$

где: V – напряжение на разрядном промежутке, равное положительному потенциалу игольчатого электрода.

Из формулы (2.7) находим

$$d = \left(\sqrt{\frac{V}{E_K \cdot r_o} - 1} \right) \cdot r_o \,. \qquad (2.8)$$

Например, для значений $r_o = 5 \cdot 10^{-2}$см и V = 15кВ зависимость (2.8) принимает вид:

$$d = d(E_K) = 5 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\sqrt{\frac{300}{E_K}} - 1 \right), \qquad (2.8а)$$

с формальным численным представлением в таблице 2.11 и графическим на рисунке 2.13.

Таблица 2.10 – Численное представление зависимости (2.8а)

E_K, $\frac{кВ}{см}$	5	10	20	24,5	30	50	70	75	95	150	200	300
d, мм	3,37	2,24	1,44	1,25	1,08	0,73	0,54	0,50	0,39	0,21	0,11	0

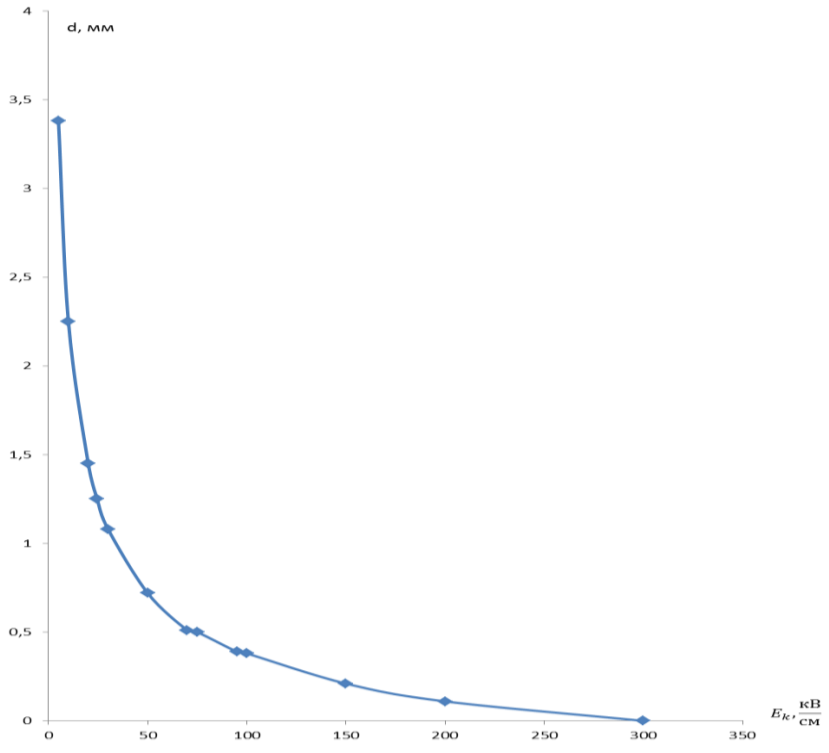


Рисунок 2.14 – График зависимости линейных размеров d чехла коронирующего игольчатого электрода с радиусом торцевого закругления r_o = 0,5 мм и напряжением на разрядном промежутке V = 15 кВ от величины критического поля зажигания короны на его острие E_K

График на рисунке 2.14 дает наглядное представление об изменениях размера чехла d в зависимости от используемых значений поля на его границе с внешней зоной. Принятие критического значения $E_К$ = 94,9 кВ/см из таблицы 2.8, согласованного с формулой (2.5) для δ =1 и r_o= $5\cdot10^{-2}$см, по результатам в таблице 2.10 отвечает значению d = 0,39мм. Однако в [60] рекомендуемое для оценок d при δ = 1 значение поля на границе чехла с внешней зоной определено как 24,5 кВ/см, в соответствии с условиями разряда для промежутков с однородным полем, когда разрядное поле $E_Р$ определено выражением:

$$E_р = 24{,}5\cdot\delta + 6{,}4\sqrt{\frac{\delta}{L}} \qquad (2.9)$$

и предел с $L \to \infty$ интерпретируется как условие прекращения эффективной ударной ионизации. Подставляя в формулу (2.8а) $E_к$ = 24,5 кВ/см, получаем приведенное в таблице 2.10 значение d = 1,25мм. Таким образом, из оценок величины d для рассмотренного примера с r_o= $5\cdot10^{-2}$см и V=15 кВ, следует d ~ 0,39 ÷ 1,25мм. Обеспечение короны перед самым выходом из сопла с осевым расположением в нем коронирующего электрода значения d позволяют дать сугубо предварительную оценку требуемому заглублению его вершины в выходное отверстие.

Вытягивание положительно заряженных ионов из чехла короны в расположенную за ним «внешнюю» зону осуществляется присутствующим там существенно более слабым полем. Сопоставительную оценку средних напряженностей поля в области чехла $E_{ЧЕХ}$ и во внешней зоне $E_{ВН}$ проведем воспользовавшись кусочно-линейной экстраполяцией распределений потенциала φ в этих областях, показанной на рисунке 2.15. При этом

$$E_{ЧЕХ} = \frac{V - \varphi(d)}{d}\ ,\ E_{ВН} = \frac{\varphi(d)}{L - d} \qquad (2.10)$$

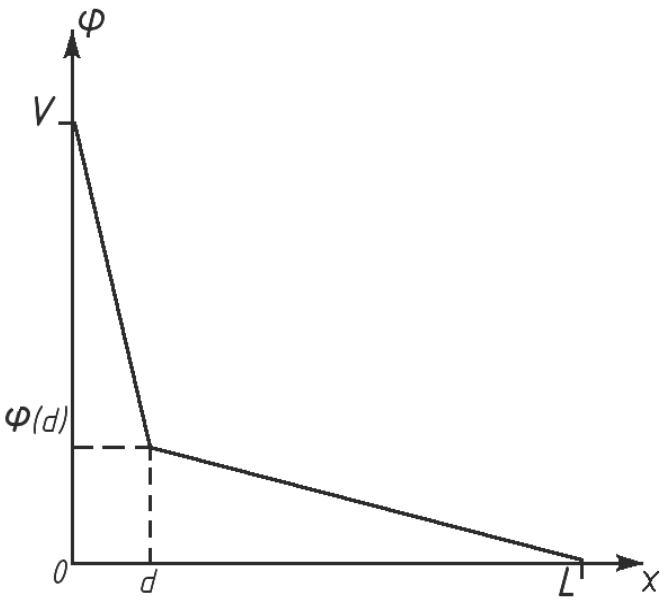


Рисунок 2.15 – Кусочно-линейная экстраполяция распределений потенциала φ в межэлектродном промежутке с положительно коронирующим игольчатым электродом

Значение потенциала на границе короны φ(d) найдем из дифференциального уравнения взаимосвязи между потенциалом φ и напряженностью поля E в приближении (2.3):

$$d\varphi = -Edx = -\frac{Vr_o dx}{(r_o + x)^2} \qquad (2.11)$$

Интегрируя (3.11), находим

$$\varphi = \frac{V}{1 + \frac{x}{r_o}} \qquad (2.12)$$

и $$\varphi(d) \approx \frac{V}{1 + \frac{d}{r_o}} \qquad (2.13)$$

Подставляя (2.13) в (2.10) получаем

$$E_{ЧЕХ} = \frac{V}{r_o + d}, \qquad E_{ВН} = E_{ЧЕХ} \cdot \frac{r_o}{L - d}.$$

В примере с V=15кВ и $r_O = 5 \cdot 10^{-2}$ см для d = 0,125 см:

$$E(d) = \frac{V \cdot r_o}{(r_o + d)^2} = \frac{15 \cdot 0{,}05}{(0{,}05 + 0{,}125)^2} = 24{,}5 \text{кВ/см},$$

$$\varphi(d) = \frac{V}{1+\frac{d}{r_o}} = \frac{15}{1+\frac{0{,}125}{0{,}05}} = 4{,}3\text{кВ}$$

$$E_{ЧЕХ} = \frac{V}{r_o + d} = \frac{15}{0{,}05 + 0{,}125} = 85{,}7\text{кВ/см} \qquad (2.14)$$

$$E_{ВН} = E_{ЧЕХ} \cdot \frac{r_o}{L-d} = 85{,}7 \cdot \frac{0{,}05}{1-0{,}125} = 4{,}9\text{кВ/см}$$

Движение положительных ионов во внешней зоне короны игольчатого электрода, в направлении обрабатываемой ими поверхности носит дрейфовый характер со скоростью

$$\upsilon_{ДР} = k_{+} \cdot E_{ВН}\,, \qquad (2.15)$$

где: κ_+ – подвижность положительных ионов в воздухе. Для значений κ_+ = 2,1 см^2/В·с [60] и $E_{ВН}$ =4,9 кВ/см из (3.15) следует

$$\upsilon_{ДР} = 2{,}1 \cdot 4{,}9 \cdot 10^3 = 10{,}3 \cdot 10^3 \text{ см/с} = 103 \text{ м/с}, \qquad (2.16)$$

т.е. примерно 1/3 от скорости звука в воздухе при нормальных условиях: $\upsilon_{ЗВ}$ = (331,36 + 0,54 t°C) м/с [58]. Применительно к стандартной атмосфере, образуемой частицами воздуха с усредненной массой

$$m_C = \frac{\rho_c}{n_c} = \frac{1{,}225}{25{,}471 \cdot 10^{24}} = 48{,}094 \cdot 10^{-27}\text{кг} \qquad (2.17)$$

кинетическая энергия направленного дрейфового движения «стандартной» частицы со скоростью (2.16) и массой (2.17) (ионизация практически не влияет на величину m_C).

$$\varepsilon_{др} = \frac{m_C \cdot \upsilon_{др}^2}{2} = \frac{48{,}094 \cdot 10^{-27} \cdot 1{,}03^2 \cdot 10^4}{2} = 2{,}551 \cdot 10^{-22}\text{Дж} = 1{,}6 \cdot 10^{-3}\text{эВ}$$

В примере с напряжением на электродах V = 15кВ и разрядным током I = 100мкА в коронном разряде выделяется мощность

$$P = I \cdot V = 100\ 10^{-6} \cdot 15 \cdot 10^3 = 1{,}5\ \text{Вт}$$

Нетрудно видеть, что в случае вакуумного межэлектродного промежутка вся эта мощность расходовалась бы на ускорение одноразрядных ионов до кинетической энергии

$$\varepsilon_{\text{вак}} = \text{e} \cdot \text{V} = 15\text{кэВ} = 2{,}4 \cdot 10^{-15}\text{Дж},$$

поскольку с учетом $n_i^+ = \frac{I}{e}$, имеем $\text{P} = \frac{\text{I}}{\text{e}} \cdot \text{eV} = \text{n}_\text{i}^+ \cdot \varepsilon_{\text{вак}}$ и скорость каждого иона при подлете к не коронирующему электроду определялась бы равенством $\frac{\text{m}_\text{C} \cdot \upsilon_{\text{вак}}^2}{2} = \text{eV}$, откуда

$$\upsilon_{\text{вак}} = \sqrt{\frac{2\text{e}}{\text{m}_\text{C}} \cdot \text{V}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}}{4{,}81 \cdot 10^{-26}}} \cdot \sqrt{15 \cdot 10^3} = 316 \cdot 10^3\,\text{м/с} \approx 3000 \cdot \upsilon_{\text{др}}$$

Однако при атмосферном давлении практически вся энергия, приобретаемая ионами в поле разрядного промежутка, передается в результате соударений молекулам воздуха. Энергия дрейфового движения ионов оказывается много меньше энергии их теплового движения при T_C = 288 К:

$$\varepsilon_\text{T} = \frac{3}{2}\text{kT}_\text{C} = \frac{3}{2} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 288 = 59{,}616 \cdot 10^{-22}\text{Дж} = 37{,}2 \cdot 10^{-3}\text{эВ} = 23{,}3 \cdot \varepsilon_{\text{др}}$$

Подводимая к не коронирующему электроду мощность от дрейфового движения положительных ионов составляет ничтожно малую величину, не оказывающую влияния на его температурный режим:

$$\text{P}_{\text{ДР}} = \text{n}_\text{i}^+ \cdot \varepsilon_{\text{ДР}} = \frac{\varepsilon_{\text{ДР}}}{\varepsilon_{\text{вак}}} \cdot \text{n}_\text{i}^+ \varepsilon_{\text{вак}} = \frac{\varepsilon_{\text{ДР}}}{\varepsilon_{\text{вак}}} \cdot \text{P} \approx \frac{1{,}6 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 10^3} \cdot \text{P} = 10^{-7}\,\text{P} \qquad (2.18)$$

Тем не менее, именно дрейфовая скорость является причиной протекания тока во внешней зоне коронного разряда, согласованного с током во внешней цепи электродного промежутка и особенностями поверхностных процессов на не коронирующем электроде, связанных с нейтрализацией поступающих на него положительных ионов свободными электронами из его объема. Образуя надтепловой добавок к $\varepsilon_\text{т}$ величина $\varepsilon_{\text{др}}$ все же способна к активации поверхностных термофлуктуационных процессов, нарушающей

условия их реализации, сравнительно со случаем при I = 0. Изменение условий равновесия поверхностного слоя не коронирующего электрода с окружающей газовой средой, в зоне адсорбированных из нее молекул органических и неорганических веществ, инициирует процесс очистки поверхности от загрязнений, способствуя тем самым осуществлению диффузионного проникновения положительных ионов в металл.

До глубин порядка наибольшей высоты микронеровностей (шероховатости) профиля поверхности h_{max}, (см. рисунок 2.16) существенное влияние на формирование покрытия способны оказать обусловленные ими микронеоднородности электрических и тепловых полей, в отношении которых вершины микровыступов играют роль концентраторов. Влияние микронеоднородностей рельефа на возможность его локальных нагревов, обусловленных нарушением баланса между подводимой и отводимой энергией за время t применительно к элементу неоднородности в виде выступа шероховатости высотой h_{max} и площадью основания s можно оценить. Если S – площадь всего токового пятна на электроде, а $P_{ДР}$ – подводимая к нему дрейфовая мощность, то в приближении однородности тока по поверхности пятна мощность, подводимая к рассматриваемому элементу микрорельефа $p_{др}$, равняется

$p_{ДР} = P_{ДР} \cdot \frac{s}{S}$, а подвод энергии за время t будет $w_{ДР} = p_{ДР} \cdot t$.

Доля этой энергии, равная $0 < \chi < 1$, за счет нарушения энергетического баланса преобразуется в тепло q, идущее на разогрев выступа:

$$q = \chi \cdot w_{ДР} = \chi \cdot \frac{s}{S} \cdot P_{ДР} \cdot t$$

При удельной теплоемкости материала электрода C_o, его плотности ρ и массе выступа порядка $m = \rho \cdot s \cdot h_{max}$ теплоемкость выступа C_h равняется $C_h = C_o \cdot m$, а его нагрев ΔT за время t оценивается выражением

$$\Delta T = \frac{q}{C_h} = \chi \cdot \frac{P_{ДР} \cdot t}{C_o \cdot \rho \cdot h_{max} \cdot S}$$

Например, для h_{max}=1мкм, S = 10мм^2 и t = $\xi_1 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3$ с,

где ξ_1 – количество часов обработки.

$$\Delta T = 3{,}6 \cdot 10^{14} \cdot \chi \cdot \xi_1 \cdot \frac{P_{ДР}}{C_o \cdot \rho} . \qquad (2.19)$$

В качестве материальных характеристик электрода воспользуемся данными по железу, полагая ρ = 7,88 · 10^3 кг/м^3 и C_o = 447,3 Дж/кг·К, для которых из формулы (2.19) следует

$$\Delta T = 1{,}02 \cdot 10^8 \cdot \chi \cdot \xi_1 \cdot P_{ДР} .$$

Если при V = 15 кВ, ток I = ξ_2 · 100 мкА, где ξ_2 – количество сотен мкА, то, принимая во внимание (2.18), получим

$$P_{ДР} = P_{ДР}(I = \xi_2 \cdot 100\,мкА) = 10^{-7} \cdot \xi_2 \cdot P(I = 100\,мкА) = 1{,}5 \cdot 10^{-7} \cdot \xi_2 Вт$$

и тогда $\Delta T = 1{,}02 \cdot 10^8 \cdot \chi \cdot \xi_1 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-7} \cdot \xi_2 = 15 \cdot \chi \cdot \xi_1 \cdot \xi_2$

В частности, при ξ_1 = 3 и ξ_2 = 4 имеем $\Delta T = \chi \cdot 180^o$ К и $\Delta T = 90^o$ К при χ = 0,5.

Выступ шероховатости высотой h_{max} в своей вершинной области с характеристическим радиусом закругления r_h может действовать и как усилитель поля относительно среднего значения $E_{ВН}$ в формуле (2.14). Перепад потенциала φ в окружающем выступе пространства с напряженностью поля $E_{ВН}$, считая от линии выступов на рисунке 2.17 с условием φ = 0 до линии впадин, составляет величину $\varphi_h = E_{ВН} \cdot h_{max.}$

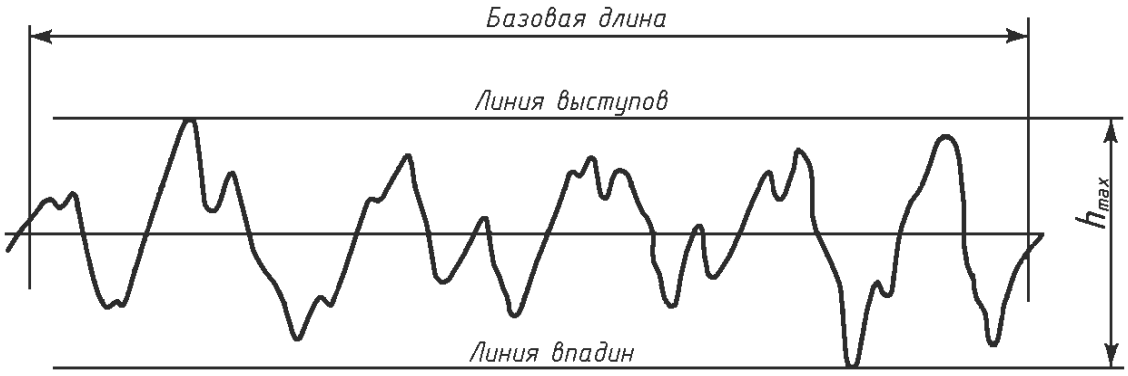


Рисунок 2.16 – Фрагмент профилограммы шероховатости

При этом поле у вершины выступа, также характеризуемой значением $\varphi = 0$, усиливается, по аналогии с (2.4), до оценочного значения

$$E_h = \frac{h}{r_h} = E_{ВН} \cdot \frac{h_{max}}{r_h}$$

Ведя отсчет текущей толщины покрытия от линии (поверхности) впадин на рисунке 2.17 можно предположить, что на глубинах, не превышающих h_{max}, покрытие, образуемое ионной обработкой поверхности, будет носить смешанный адгезионно – диффузионный характер, поскольку адгезионная составляющая, следуя рельефу шероховатости, будет присутствовать на всех этих глубинах. Наиболее проблематичным для предварительных оценок является совокупный учет влияния на структуру покрытия всех вышеупомянутых факторов, обусловленных шероховатостью обрабатываемой поверхности и особенно значимый для покрытий толщиной $\sim h_{max}$.

2.3 Особенности диффузионного процесса при формировании дискретного диффузионного упрочнения

В этой связи воспользуемся оценкой эффективной характеристики процесса образования покрытия, порождаемой представлением его в виде диффузионного проникновения ионов на глубину H за время обработки t. Эффективной характеристикой такого представления служит коэффициент диффузии $Д_{ЭФ}$, связанный с величинами H и t равенством [62, 63].

$$Д_{ЭФ} = \frac{H^2}{4t} \qquad (2.20)$$

Для H = 1 мкм= 10^{-4} см и t = $\xi_1 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3$ с из формулы (2.20) следует

$$Д_{ЭФ} \approx \frac{7 \cdot 10^{-13}}{\xi_1} \text{ см}^2/\text{с}.$$

и $Д_{ЭФ} \approx 2{,}3 \cdot 10^{-13}$ см^2/с при $\xi_1 = 3$.

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.

Механизм проявления этих особенностей вызывает затруднения, поскольку:

– «самые сложные процессы, трудно поддающиеся исследованию, протекают на поверхности металла при его взаимодействии с ионизированной газовой фазой» [64];

– «отсутствие научных представлений о взаимодействии газовой среды, активизированной тлеющим коронным разрядом, с насыщаемой поверхностью металла затрудняет понимание механизма формирования диффузионного слоя и управления его качеством» [64];

– «вопрос – механизме пограничной диффузии – один из наименее ясных» [65];

– «измерить коэффициент диффузии при температурах ниже 0,6 $T_{пл}$ ($T_{пл}$ – температура плавления) обычно не удается, т.к. не хватает чувствительности» [65].

В силу отмеченных обстоятельств обсуждение конкретных механизмов формирования диффузионного покрытия несколько преждевременным и ограничимся формальным подходом к рассмотрению следствий предполагаемого влияния. При этом в качестве рабочей воспользуемся гипотезой возникновения излома в линейной зависимости логарифма коэффициента диффузии Д от величины, обратной температуре Т, дополнительного к инициируемому возрастающим влиянием пограничной составляющей диффузионного процесса при $T \leq 0{,}6 \div 0{,}7\ T_{пл}$ [65], но проявляющего себя при значительно меньших температурах в связи с открытием дополнительных «путей ускоренной диффузии» [62].

Описываемая законом Аррениуса температурная зависимость коэффициента диффузии Д имеет вид [62]

$$Д = Д_o \cdot \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right), \qquad (2.21)$$

где: $Д_o$ и Q – соответственно предэкспоненциальный множитель и энтальпия активации диффузии, зависящие от диффундирующего элемента и материала обрабатываемой поверхности; k = $1{,}38\cdot10^{-23}$Дж/°К = 8,617·10-5 эВ/°К – постоянная Больцмана.

Воспользуемся практическими удобствами от перехода к нормированным безразмерным величинам и в качестве условных обозначений примем

$$\overline{Д_o} = 0{,}01 см^2/с,\ \overline{Q} = 1эВ,\ \overline{T} = 293^o К, \qquad (2.22)$$

полагая

$$Д_o = \lambda_1 \cdot \overline{Д_o},\quad Q = \lambda_2 \cdot \overline{Q},\quad T = \lambda_3 \cdot \overline{T}, \qquad (2.23)$$

где: λ_1, λ_2 и λ_3 – безразмерные сомножители. При этом

$$\frac{\overline{Q}}{\overline{kT}} = 39{,}612,$$

а после перехода от основания *e* к основанию 10, формула (2.21) принимает вид

$$Д = 10^{-2} \cdot \lambda_1 \cdot \exp\left(-39{,}612 \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right) = \lambda_1 \cdot 10^{-n} см^2/с \qquad (2.24)$$

где:

$$n = 2 + 17{,}203 \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_3} \qquad (2.25)$$

В функциональных координатах (lgД; $1/\lambda_3$) и при условии неизменности величин λ_1, λ_2 во всем температурном диапазоне имеет место линейная зависимость lgД от $1/\lambda_3$:

$$\lg Д = \lg\lambda_1 - 2 - 17{,}203 \cdot \lambda_2 \cdot \frac{1}{\lambda_3}, \qquad (2.26)$$

Область с $\lambda_3 \geq 1$ разделим на два диапазона – нижний с $\lambda_3 \in [1;\ \overset{*}{\lambda}_3]$ и верхний с $\lambda_3 = \overset{*}{\lambda}_3$. Значения λ_1 и λ_2, относимые к нижнему λ_3 – диапазону, помечены штрихами, полагая

$$\lg Д = \begin{cases} \lg\lambda_1^{\backslash} - 2 - 17{,}203 \cdot \lambda_2^{\backslash} \cdot \dfrac{1}{\lambda_3} & - \quad \text{при} \lambda_3 \in \left[1; \overset{*}{\lambda}_3\right]; \\ \lg\lambda_1 - 2 - 17{,}203\,\lambda_2 \cdot \dfrac{1}{\lambda_3} & - \quad \text{при} \quad \lambda_3 \geq \overset{*}{\lambda}_3 \end{cases} \tag{2.27}$$

Для верхнего λ_3 - диапазона примем условия независимости величин λ_1 и λ_2 от λ_3, а для нижнего диапазона допустим возможность изменений $\lambda_1^{\backslash}$ и $\lambda_2^{\backslash}$ при изменении λ_3, но с сохранением линейности у функциональной зависимости lgД от $1/\lambda_3$.

Если значениям аргумента этой функции, равным $1/\overset{*}{\lambda}_3$ и 1, сопоставлены значения функции, обозначенные соответственно $\lg\overset{*}{Д}$ и $\lg Д_1$, то уравнение прямой, проходящей через две точки с координатами $(1/\overset{*}{\lambda}_3;\ \lg\overset{*}{Д})$ и $(1;\ \lg Д_1)$, в общем случае имеет вид

$$\lg Д = \frac{\lg\overset{*}{Д} - \dfrac{1}{\lambda_3^*} \cdot \lg Д_1}{1 - \dfrac{1}{\lambda_3^*}} + \frac{\lg Д_1 - \lg\overset{*}{Д}}{1 - \dfrac{1}{\lambda_3^*}} \cdot \frac{1}{\lambda_3} \tag{2.28}$$

В (2.27) сохранение линейности для нижнего λ_3 – диапазона обеспечивается использованием зависимостей

$$\lambda_1^{\backslash} = \lambda_1 \cdot 10^{\,p \cdot \frac{1}{\lambda_3} + q} \qquad \text{и} \quad \lambda_2^{\backslash} = (a \cdot \lambda_3 + в) \cdot \lambda_2 \tag{2.29}$$

с постоянными коэффициентами p, q, *а*, *в* приводящих к выражению

$$\lg Д = (\lg\lambda_1 + q - 17{,}203 \cdot a \cdot \lambda_2 - 2) + (p - 17{,}203 \cdot в \cdot \lambda_2) \cdot \frac{1}{\lambda_3} \tag{2.30}$$

с граничными значениями

$$\lg Д_1 = \lg\lambda_1 + (p + q) - 2 - 17{,}203\,(a + \cdot в) \cdot \lambda_2 \quad \text{при} \quad \lambda_3 = 1 \tag{2.31}$$

и

$$\lg \overset{*}{Д} = \lg\lambda_1 + (p \cdot \frac{1}{\overset{*}{\lambda_3}} + q) - 2 - 17{,}203\,(\overset{*}{a} \cdot \lambda_3 + \cdot в) \cdot \frac{\lambda_2}{\overset{*}{\lambda_3}} \quad \text{при} \quad \lambda_3 = \overset{*}{\lambda_3} \tag{2.32}$$

Нетрудно убедиться, что (2.31) и (2.32) могут быть получены и из условия равенства между (2.28) и (2.30).

Дополняя (2.29) равенствами

$$p + q = \lg\alpha, \qquad a + в = \beta$$

$$p \cdot \frac{1}{\overset{*}{\lambda_3}} + q = \lg\overset{*}{\alpha}, \qquad \overset{*}{a} \cdot \lambda_3 + в = \overset{*}{\beta}, \tag{2.33}$$

получаем следующие определения граничных значений $\lambda_1^{\backslash}$ и $\lambda_2^{\backslash}$:

$$\lambda_1^{\backslash} = \alpha \cdot \lambda_1, \qquad \lambda_2^{\backslash} = \beta \cdot \lambda_2 \quad - \quad \text{при} \ \lambda_3 = 1, \tag{2.34}$$

$$\lambda_1^{\backslash} = \overset{*}{\alpha} \cdot \lambda_1, \qquad \lambda_2^{\backslash} = \overset{*}{\beta} \cdot \lambda_2 \quad - \quad \text{при} \ \lambda_3 = \overset{*}{\lambda_3}$$

Следствиями (2.33) являются соотношения:

$$p = \frac{\overset{*}{\lambda_3}}{\overset{*}{\lambda_3} - 1} \cdot \lg\frac{\alpha}{\overset{*}{\alpha}}, \qquad q = \lg\alpha - p = \frac{\overset{*}{\lambda_3}\lg\overset{*}{\alpha} - \lg\alpha}{\overset{*}{\lambda_3} - 1}, \tag{2.35}$$

$$a = \frac{\overset{*}{\beta} - \beta}{\overset{*}{\lambda_3} - 1}, \qquad в = \beta - a = \frac{\beta \cdot \overset{*}{\lambda_3} - \overset{*}{\beta}}{\overset{*}{\lambda_3} - 1}$$

Выражения (2.31) и (2.32) с учетом (2.33) принимают вид:

$$\lg Д_1 = \lg\lambda_1 + \lg\alpha - 2 - 17{,}203 \cdot \beta \cdot \lambda_2,$$

$$\lg \overset{*}{Д} = \lg\lambda_1 + \lg\overset{*}{\alpha} - 2 - 17{,}203 \cdot \overset{*}{\beta} \cdot \lambda_2 \cdot \frac{1}{\overset{*}{\lambda_3}} \tag{2.36}$$

Условие непрерывности для зависимости lgД $(1/\lambda_3)$ на общей границе нижнего и верхнего λ_3 – диапазонов, где $\lambda_3 = \overset{*}{\lambda_3}$ и lgД = $\lg\overset{*}{Д}$, будет соблюдено при удовлетворении равенства

$$\lg\lambda_1 + \lg\overset{*}{\alpha} - 2 - 17{,}203 \cdot \overset{*}{\beta} \cdot \lambda_2 \cdot \frac{1}{\overset{*}{\lambda_3}} = \lg\lambda_1 - 2 - 17{,}203 \cdot \lambda_2 \cdot \frac{1}{\overset{*}{\lambda_3}}$$

определяющего, для заданного значения $\overset{*}{\lambda}_3$, взаимосвязи между величинами $\overset{*}{\alpha}$ и $\overset{*}{\beta}$ в (2.34):

$$\lg\overset{*}{\alpha}=17{,}203\cdot\frac{\lambda_2}{\overset{*}{\lambda}_3}(\overset{*}{\beta}-1), \qquad \overset{*}{\beta}=1+\frac{\overset{*}{\lambda}_3\cdot\lg\overset{*}{\alpha}}{17{,}203\cdot\lambda_2} \tag{2.37}$$

Взаимосвязи между величинами α и β в (2.34), аналогичные (2.37), следуют из (2.36) при условии задания значения $\lg Д_1$:

$$\lg\alpha=(\lg Д_1-\lg\lambda_1+2)+17{,}203\cdot\beta\cdot\lambda_2, \qquad \beta=\frac{\lg\alpha-(\lg Д_1-\lg\lambda_1+2)}{17{,}203\cdot\lambda_2} \tag{2.38}$$

График кусочно-линейной зависимости lgД $(1/\lambda_3)$, экстраполированный в область температур $T > T_{пл}$, качественно приведен на рисунке 2.17 для диапазона значений $1/\lambda_3 \in (0;\ 1]$. На этом же рисунке отмечены характеристические точки A, $\tilde{A}$, B, $\tilde{B}$, C с координатами($(1/\lambda_3)$, lgД):

A $(0;\ \lg\lambda_1 - 2)$,

$\tilde{A}$ $(1;\ \lg\lambda_1 - 2 - 17{,}203\cdot\lambda_2)$,

B $(1/\overset{*}{\lambda}_3;\ \lg\lambda_1 - 2 - 17{,}203\cdot\lambda_2\cdot 1/\overset{*}{\lambda}_3)$,

$\tilde{B}$ $(1;\ \lg\lambda_1 - 2 - 17{,}203\cdot\lambda_2\cdot 1/\overset{*}{\lambda}_3)$,

C $(1;\ \lg Д_1)$. (2.39)

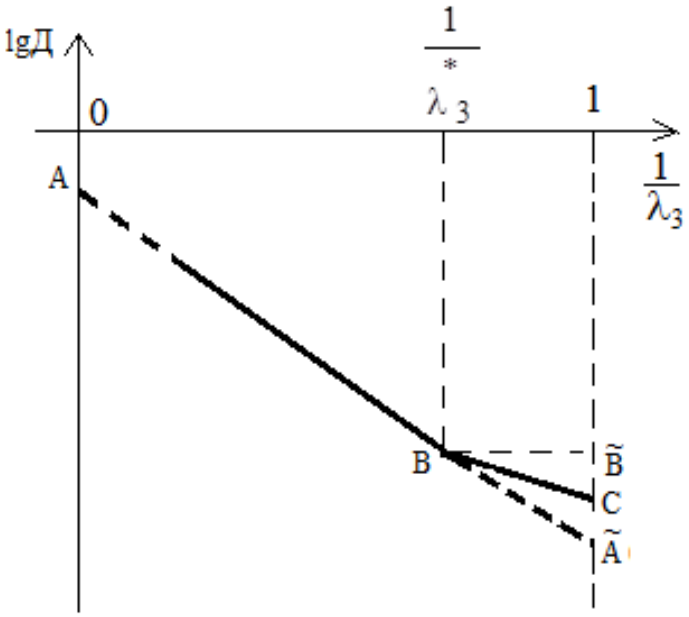


Рисунок 2.17 – Качественная картина излома в линейной зависимости lgД от $1/\lambda_3$

Условия нахождения точки С между точками $\tilde{A}$ и $\tilde{B}$ определяются двойным неравенством:

$$\lg\lambda_1 - 2 - 17{,}203 \cdot \lambda_2 \langle \cdot \lg\lambda_1 - 2 - 17{,}203 \cdot \lambda_2 \cdot \frac{1}{\lambda_3^*}$$

или неравенством

$$\lambda_3^* > \lambda_{3\min}^* = \frac{17{,}203 \cdot \lambda_2}{\lg\lambda_1 - 2 - \lg Д_1} = \frac{17{,}203 \cdot \lambda_2}{17{,}203 \cdot \beta \cdot \lambda_2 - \lg\alpha} \qquad (2.40)$$

при $\lg\lambda_1 - 2 - 17{,}203 \cdot \lambda_2 \langle \cdot \lg Д_1 - < \lg\lambda_1 - 2$.

Неравенство (2.40) означает, что при задании значения $\lg Д_1$ значение λ_3^* должно быть таким, чтобы удовлетворялось условие $\lg Д^* > \lg Д_1$.

Таким образом, с формально-математической точки зрения, графическое построение предполагаемого излома при некотором значении $\lambda_3 = \lambda_3^*$ не представляет никаких сложностей и при известности значений λ_1 и λ_2 осуществляется выборкой значений λ_3^* и $\lg Д_1$, с учетом (2.40), что полностью определяет координаты точек А, В и С в (2.39) и на рисунке 2.18. При этом формально допустимые взаимосвязи между величинами $\lg\alpha^*$ и β^*, а также между $\lg\alpha$ и β, описываются (2.37) и (2.38): выборка значений β^* и β определяет значения $\lg\alpha^*$ и $\lg\alpha$, и наоборот. Конкретизация упомянутых взаимосвязей позволяет по (2.35) найти численные значения коэффициентов p, q, *а* и *в*, определяющих зависимости $\lambda_1^{\backslash}$ и $\lambda_2^{\backslash}$ от λ_3 в соответствии с (2.29). Предполагая, что среди многообразия допустимых вариантов численных взаимосвязей, существуют и варианты взаимосвязей, реализуемые физически.

В качестве конкретного примера влияния низкотемпературного излома линейности на численные значения коэффициента диффузии при комнатной

температуре рассмотрим вариант со скачкообразным уменьшением значений λ_1 и λ_2 до $\lambda_1^{\backslash}$ и $\lambda_2^{\backslash}$, происходящим при уменьшении λ_3 до некоторого значения $\overset{*}{\lambda}_3$, которые далее остаются неизменными. Согласно (2.34) в этом варианте предполагается существование равенств $\alpha = \overset{*}{\alpha}$ и $\beta = \overset{*}{\beta}$, из которых на основании (2.35), (2.37) и (2.38) следует: p = 0, q = lgα, *а* = 0 и *в* = β, а также

$$\beta = \frac{\lg\alpha + \lg\lambda_1 - \lg Д_1 - 2}{17{,}203\cdot\lambda_2} = 1 + \frac{\overset{*}{\lambda}_3\cdot\lg\alpha}{17{,}203\cdot\lambda_2} \qquad (2.41)$$

Из (3.41) и (3.36) получаем определения для $\lambda_1^{\backslash}$ и $\lambda_2^{\backslash}$:

$$\lambda_2^{`} = \beta\cdot\lambda_2 = \frac{(\lg\lambda_1 - \lg Д_1 - 2)\cdot\overset{*}{\lambda}_3 - 17{,}203\cdot\lambda_2}{17{,}203\cdot(\overset{*}{\lambda}_3 - 1)} \qquad (2.42)$$

$\lg\lambda_1^{\backslash} = \lg(\alpha\cdot\lambda_1) = \lg Д_1 + 2 + 17{,}203\cdot\lambda_2^{\backslash}$,

позволяющие, при известности λ_1 и λ_2, установить, какими должны быть согласованные значения $\lambda_1^{\backslash}$ и $\lambda_2^{\backslash}$, чтобы «излом», приводящий к некоторому значению $\lg Д_1$, удовлетворяя условию (2.40), совершался при используемом значении $\overset{*}{\lambda}_3$. Согласно выражениям (2.42) известные значения λ_1, λ_2 и $\lg Д_1$ не позволяют дать однозначный ответ соответствующих им значениям $\lambda_1^{\backslash}$ и $\lambda_2^{\backslash}$ и $\overset{*}{\lambda}_3$.

Числовой аспект взаимосвязей (2.42) проиллюстрируем на классическом примере диффузии внедрения углерода в α – железо при $Д_o$ = 0,004 см^2/с и Q = 0,83 эВ [66]. Согласно (2.22) и (2.23) в этом случае λ_1 = 0,4 и λ_2 = 0,83. Подставляя значения λ_1 и λ_2 в формулировку закона Аррениуса (2.26), не предполагающую наличие излома, получаем

$$\lg Д = -2{,}398 - 14{,}278\cdot\frac{1}{\lambda_3}$$

и $\lg Д = -2{,}398$; $Д = Д_o = 4\cdot10^{-3}$ см^2/с – при $\frac{1}{\lambda_3} = 0$,

$$\lg Д = -16,676;\ Д = 2,109\cdot 10^{-17}\ см^2/с - при\ \frac{1}{\lambda_3}=1. \qquad (2.43)$$

Значения $1/\lambda_3$ и $\lg Д$ в (3.43) определяют координаты точек А и $\tilde{А}$ на рисунке 2.18: А (0; – 2, 398), $\tilde{А}$ (1; – 16, 676).

С используемыми значениями λ_1 и λ_2 выражения (2.40) и (2.42) принимают вид: $\overset{*}{\lambda}_3 > \overset{*}{\lambda}_{3min} = \frac{14,278}{-2,398-\lg Д_1}$, $-16,676 < \lg Д_1 < -2,398$,

$$\lambda_2^{`} = \frac{(1-2,398-\lg Д_1)\cdot \overset{*}{\lambda}_3 - 14,278}{17,203\cdot(\overset{*}{\lambda}_3 - 1)}, \qquad (2.44)$$

$\lg\lambda_1^{\backslash} = \lg Д_1 + 2 + 17,203 \cdot \lambda_2^{\backslash}$.

Результаты расчета зависимости $\overset{*}{\lambda}_{3\,min}(\lg Д_1)$ приведены в таблице 2.11 и на рисунке 2.18, а в таблице 2.12 и на рисунках 2.19 – 2.20 приведены зависимости $\lambda_1^{\backslash}$ и $\lambda_2^{\backslash}$ от $\overset{*}{\lambda}_3$, которые определяют, согласно (2.44), значения $\lg Д_1$ = – 15; – 14; – 13 (вместо $\lg Д_1$ = – 16, 676, что имеет место при комнатной температуре в отсутствии излома).

Таблица 2.11 – Результаты расчётов зависимости излома от температуры $\overset{*}{\lambda}_{3\,min}$ от $\lg Д_1$

$\lg Д_1$	-16,676	-16	-15,5	-15	-14,5	-14	-13,5	-13	-12,5	-12	-11,5	-11	-10,5	-10	-2,398
$\overset{*}{\lambda}_{3\,min}$	1	1,050	1,090	1,133	1,180	1,231	1,286	1,347	1,413	1,487	1,569	1,660	1,762	1,878	∞
$\overset{*}{T}_{min}$ °C	20	34,7	46,4	58,96	72,74	87,68	103,8	121,7	141,0	162,7	186,7	213,4	243,3	277,3	∞

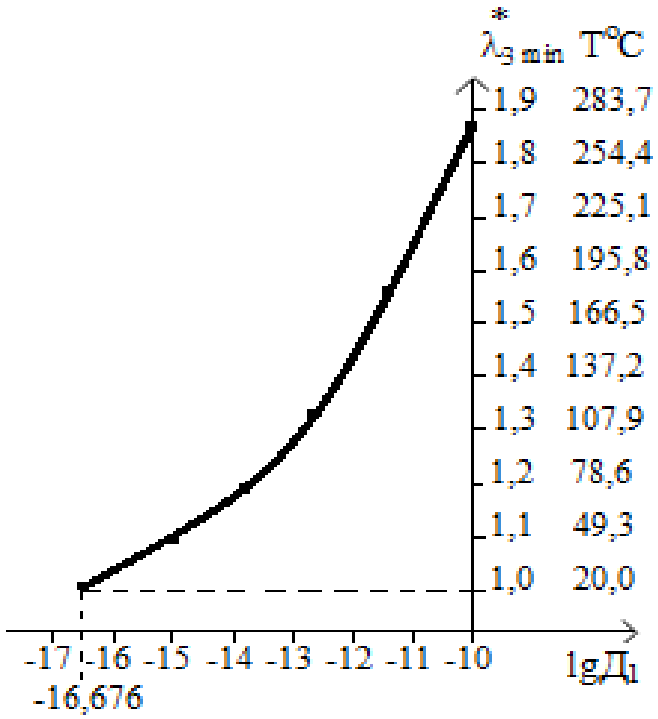


Рисунок 2.18 – График зависимости излома от температуры $\lambda^*_{3\,min}$ от lgД$_1$

Таблица 2.12 – Результаты расчетов значений $\lambda_1^{\backslash}$ и $\lambda_2^{\backslash}$ при различных значениях λ^*_3 и lgД$_1$

lgД$_1$	λ^*_3	1,133	1,231	1,3	1,347	1,4	1,6	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
	T^*°C	59,0	87,7	107,9	121,7	137,2	195,8	313,0	459,5	606,0	752,5	899,0
-16,676	$\lambda_2^{\backslash}$	0,83										
	$lg\lambda_1^{\backslash}$	- 0,398										
-15	$\lambda_2^{\backslash}$	0	0,311	0,408	0,452	0,489	0,570	0,635	0,668	0,684	0,694	0,700
	$lg\lambda_1^{\backslash}$	-13	-7,650	-5,981	-5,224	-4,588	-3,194	-2,076	-1,508	-1,233	-1,061	-0,958
-14	$\lambda_2^{\backslash}$	- ″ -	0	0,156	0,226	0,286	0,415	0,519	0,571	0,597	0,612	0,623
	$lg\lambda_1^{\backslash}$	- ″-	-12	-9,316	-8,112	-7,080	-4,861	-3,072	-2,178	-1,730	-1,472	-1,283
-13	$\lambda_2^{\backslash}$	- ″ -	- ″ -	- ″ -	0	0,082	0,260	0,403	0,474	0,509	0,531	0,545
	$lg\lambda_1^{\backslash}$	- ″ -	- ″ -	- ″ -	-11	-9,590	-6,527	-4,067	-2,846	-0,244	-1,866	-1,624

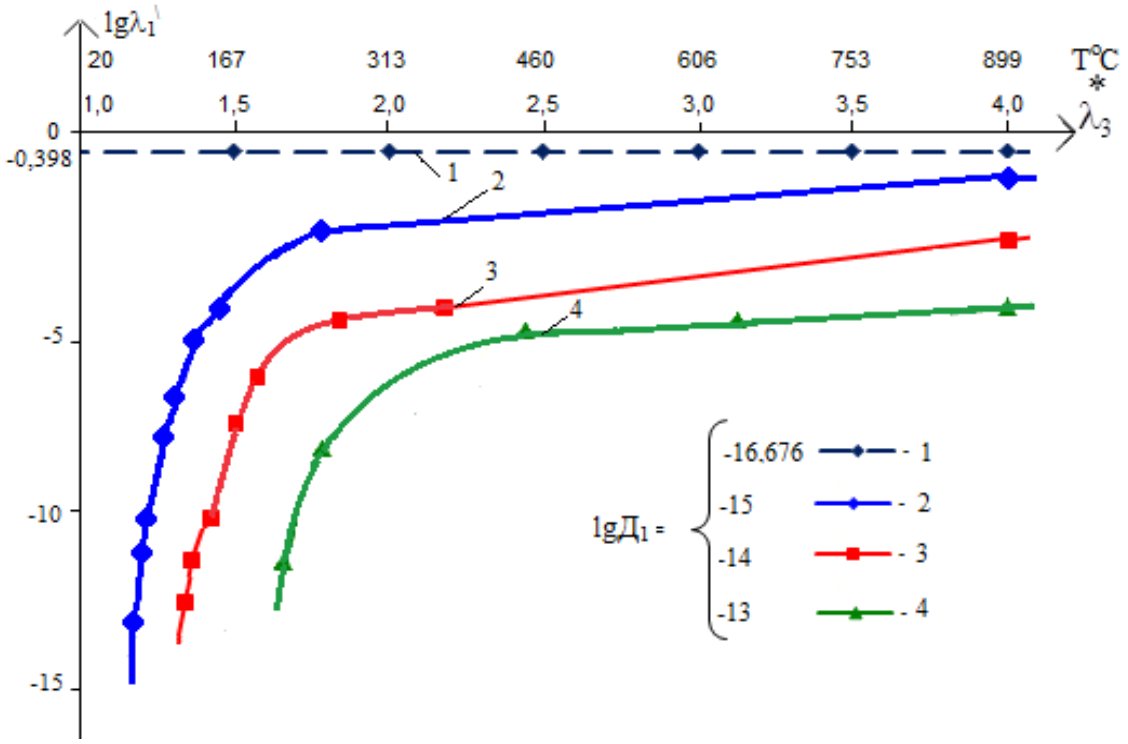


Рисунок 2.19 – График зависимостей $\lg\lambda_1^{\backslash}$ от $\overset{*}{\lambda}_3$ для различных значений $\lg Д_1$

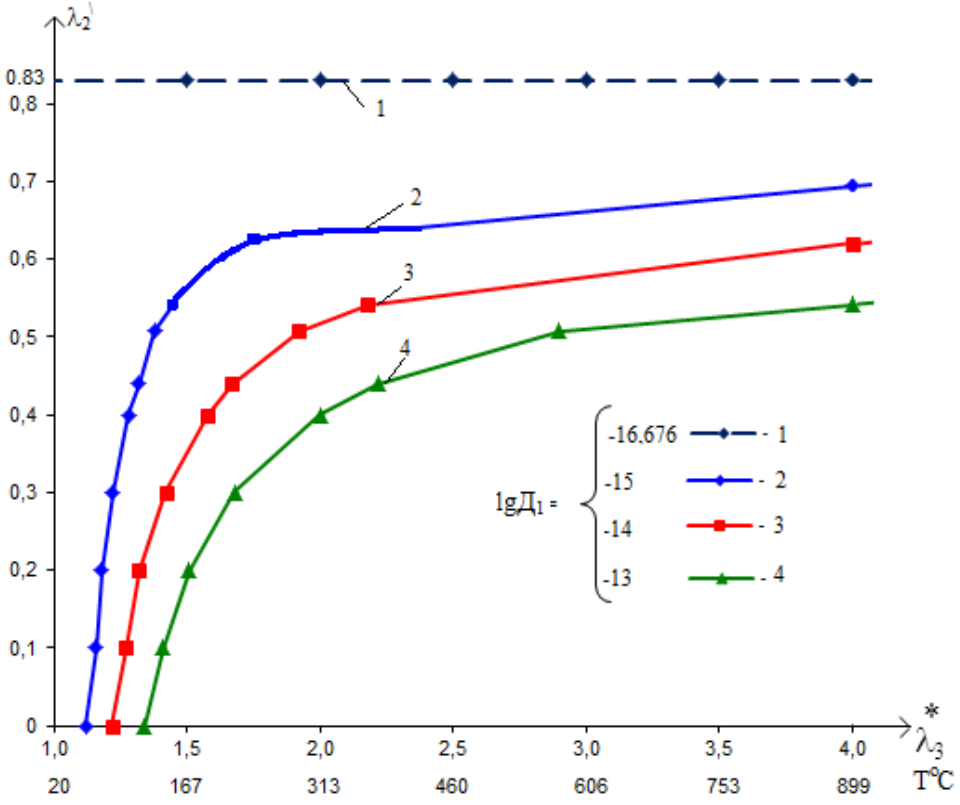


Рисунок 2.20 – График зависимостей $\lambda_2^{\backslash}(\overset{*}{\lambda}_3)$ для различных значений $\lg Д_1$

Пересчет по (2.23) значений $\lambda_1^{\backslash}$ и $\lambda_2^{\backslash}$ из таблицы 2.11 в значения $\grave{Д}_o = \grave{\lambda}_1 \cdot \overline{Д_o}$ и $\grave{Q} = \grave{\lambda}_2 \cdot \overline{Q}$ показывает, что, в случае обусловленности излома скачкообразным изменением параметров диффузионного процесса при температуре $\overset{*}{T}$, коэффициент диффузии С в α – Fe при комнатной температуре Т = 20°С может быть увеличен со значения $Д = 2{,}109 \cdot 10^{-17}$ см^2/с (при $Д_o = 0{,}004$ см^2/с и Q = 0,83 эВ)

– до значения $Д_1 = 10^{-15}$ см^2/с согласованиями:

$Д_o^{\backslash} = 3{,}105 \cdot 10^{-4}$ см^2/с, $Q^{\backslash} = 0{,}668$ эВ – при $\overset{*}{T} = 459{,}5$ °С;

$Д_o^{\backslash} = 8{,}395 \cdot 10^{-5}$ см^2/с, $Q^{\backslash} = 0{,}635$ эВ – при $\overset{*}{T} = 313$ °С;

– до значения $Д_1 = 10^{-14}$ см^2/с согласованиями:

$Д_o^{\backslash} = 6{,}637 \cdot 10^{-5}$ см^2/с, $Q^{\backslash} = 0{,}571$ эВ – при $\overset{*}{T} = 459{,}5$ °С;

$Д_o^{\backslash} = 8{,}472 \cdot 10^{-6}$ см^2/с, $Q^{\backslash} = 0{,}519$ эВ – при $\overset{*}{T} = 313$ °С;

– до значения $Д_1 = 10^{-13}$ см^2/с согласованиями:

$Д_o^{\backslash} = 1{,}46 \cdot 10^{-5}$ см^2/с, $Q^{\backslash} = 0{,}474$ эВ – при $\overset{*}{T} = 459{,}5$ °С;

$Д_o^{\backslash} = 8{,}570 \cdot 10^{-7}$ см^2/с, $Q^{\backslash} = 0{,}403$ эВ – при $\overset{*}{T} = 313$ °С.

Рассмотренный вариант со скачкообразными изменениями параметров диффузии при $\lambda_3 = \overset{*}{\lambda}_3$ характеризуется жесткими требованиями согласования этих параметров и значительными уменьшениями $Д_o^{\backslash}$. В качестве альтернативы рассмотрим вариант с отсутствием скачкообразных изменений при $\lambda_3 = \overset{*}{\lambda}_3$, также на примере диффузии С в α – Fe. При этом в (2.34) $\overset{*}{\alpha} = \overset{*}{\beta} = 1$ и из (2.35) следует:

$$p = \frac{\overset{*}{\lambda}_3}{\overset{*}{\lambda}_3 - 1} \cdot \lg \alpha, \qquad q = \lg \alpha - p = -\frac{\lg \alpha}{\overset{*}{\lambda}_3 - 1},$$

$$a = \frac{1-\beta}{\overset{*}{\lambda}_3 - 1}, \qquad в = \beta - a = \frac{\beta \cdot \overset{*}{\lambda}_3 - 1}{\overset{*}{\lambda}_3 - 1} \tag{2.45}$$

Величина $\overset{*}{\lambda}_3$ в (2.45) по прежнему должна удовлетворять общему неравенству (2.40) с конкретизацией $\overset{*}{\lambda}_{3\,min}$ в (2.44), а также в таблице 2.11 и на рисунке 2.18.

Усилим альтернативность рассматриваемого варианта требованием неизменности предэкспоненциального множителя, т.е. равенством α = 1. Согласно (2.38), (2.40), (2.44) и (2.45) при α = 1 имеем:

$$\beta = \frac{\lg\lambda_1 - 2 - \lg Д_1}{17{,}203 \cdot \lambda_2} = \frac{-2{,}398 - \lg Д_1}{17{,}278} = \frac{1}{\overset{*}{\lambda}_{3min}},$$

$$p = q = 0, \qquad a = \frac{1-\beta}{\overset{*}{\lambda}_3 - 1}, \tag{2.46}$$

$$в = \beta - a = \frac{\beta \cdot \overset{*}{\lambda}_3 - 1}{\overset{*}{\lambda}_3 - 1}.$$

Из (2.29) и (2.30) находим: $\lambda_1^{\backslash} = 0{,}4$;

$$\lambda_2^{`} = 0{,}83 \cdot \left(\frac{1-\beta}{\overset{*}{\lambda}_3 - 1} \cdot \lambda_3 + \frac{\beta \cdot \overset{*}{\lambda}_3 - 1}{\overset{*}{\lambda}_3 - 1} \right);$$

$$\lg Д = (-2{,}398 - 14{,}278 \cdot \frac{1-\beta}{\overset{*}{\lambda}_3 - 1}) - 14{,}278 \cdot \frac{\beta\overset{*}{\lambda}_3 - 1}{\overset{*}{\lambda}_3 - 1} \cdot \frac{1}{\lambda_3} \quad - \quad \text{для} \quad \lambda_3 \in \left[1; \overset{*}{\lambda}_3\right]; \tag{2.47}$$

$$\lg Д = \begin{cases} -2{,}398 - 14{,}278 \cdot \beta \quad - \quad \text{при} \lambda_3 = 1; \\ -2{,}398 - 14{,}278 \cdot \dfrac{1}{\overset{*}{\lambda}_3} - \quad \text{при} \quad \lambda_3 = \overset{*}{\lambda}_3 \end{cases}$$

Применим (2.46) и (2.47) к случаю с $\lg Д_1 = -13$. Тогда: β = 0,743;

$\overset{*}{\lambda}_{3\,min} = 1{,}347 \rightarrow \overset{*}{T}_{min} = 121{,}7^{o}C$; $p = q = 0$; $\frac{1}{\overset{*}{\lambda}_{3min}} = 0{,}742$;

$$a = \frac{0{,}257}{\overset{*}{\lambda}_3 - 1}, \qquad в = \frac{0{,}743 \cdot \overset{*}{\lambda}_3 - 1}{\overset{*}{\lambda}_3 - 1}; \qquad \lambda_1^{\backslash} = 0{,}4; \tag{2.48}$$

$$\lambda_2^{`} = 0{,}83 \cdot \left(\frac{0{,}257}{\overset{*}{\lambda}_3 - 1} \cdot \lambda_3 + \frac{0{,}743 \cdot \overset{*}{\lambda}_3 - 1}{\overset{*}{\lambda}_3 - 1} \right) = \begin{cases} 0{,}83 \cdot 0{,}743 = 0{,}617 & - \text{ при } \lambda_3 = 1; \\ 0{,}83 & - \text{ при } \lambda_3 = \overset{*}{\lambda}_3. \end{cases}$$

$$\lg Д = (-2{,}398 - \frac{3{,}669}{\overset{*}{\lambda}_3 - 1}) - 14{,}278 \cdot \frac{0{,}743 \cdot \overset{*}{\lambda}_3 - 1}{\overset{*}{\lambda}_3 - 1} \cdot \frac{1}{\lambda_3} \quad - \text{ для } \quad \lambda_3 \in \left[1; \overset{*}{\lambda}_3 \right];$$

$$\lg Д = \begin{cases} -13 & - \text{ при } \lambda_3 = 1; \\ -2{,}398 - 14{,}278 \cdot \frac{1}{\overset{*}{\lambda}_3} & - \text{ при } \lambda_3 = \overset{*}{\lambda}_3 \end{cases}$$

Выражения в (2.48) описывают, сугубо в иллюстративных целях, случай воображаемого излома в функциональной зависимости $\lg Д(1/\lambda_3)$, приводящего к увеличению коэффициента диффузии C в α - Fe при температуре T = 20°C с $2{,}109 \cdot 10^{-17}$ см^2/с до 10^{-13} см^2/с. Предполагается, что процессы, обуславливающие излом, начинают проявлять себя при некоторой температуре $\overset{*}{T} > \overset{*}{T}_{min} = 121{,}7^{o}C$ и приводят к постепенному уменьшению энтальпии активации с 0,83 эВ при $T \geq \overset{*}{T}$ до 0,617 эВ при T = 20 °C, оставляя неизменным предэкспоненциальный коэффициент, равный 0,004 см^2/с. Если, например, $\overset{*}{T} = 313^{o}C$, то $\overset{*}{\lambda}_3 = 2$ и тогда в (3.48):

$$a = 0{,}257; \quad в = 0{,}486; \quad \lambda_2^{`} = 0{,}213 \cdot \lambda_3 + 0{,}404 = \begin{cases} 0{,}617 - & \text{при } \lambda_3 = 1; \\ 0{,}83 & - \text{ при } \lambda_3 = \overset{*}{\lambda}_3 = 2. \end{cases}$$

Результирующее описание излома осуществляется выражениями:

$$\lg Д = \begin{cases} -6{,}067 - 6{,}933 \cdot \dfrac{1}{\lambda_3} & - \quad \text{при} \lambda_3 \in [1;\ 2] \\ -2{,}398 - 14{,}278 \cdot \dfrac{1}{\lambda_3} & - \quad \text{при} \quad \lambda_3 \geq 2 \end{cases}$$

$Д_o = 0{,}004$ см^2/с;

$$Q = \begin{cases} 0{,}404 + 0{,}213 \cdot \dfrac{1}{1/\lambda_3} & - \quad \text{при} \lambda_3 \in [1;\ 2]; \\ 0{,}83 \text{эВ} \end{cases},$$

Результаты представлены в виде графиков на рисунке 2.21.

Широкий спектр возможностей общих преобразований (2.29), демонстрируемый рассмотренными примерами, свидетельствует о приемлемости привлечения, в качестве рабочей, гипотезы «излома» для объяснения способности формирования диффузионных покрытий при комнатных температурах. Эта гипотеза представляет наиболее простой и универсальный способ формализации описания разнообразных низкотемпературных отклонений от закона Аррениуса, носящих монотонный характер, причем на основе особенностей его же применения.

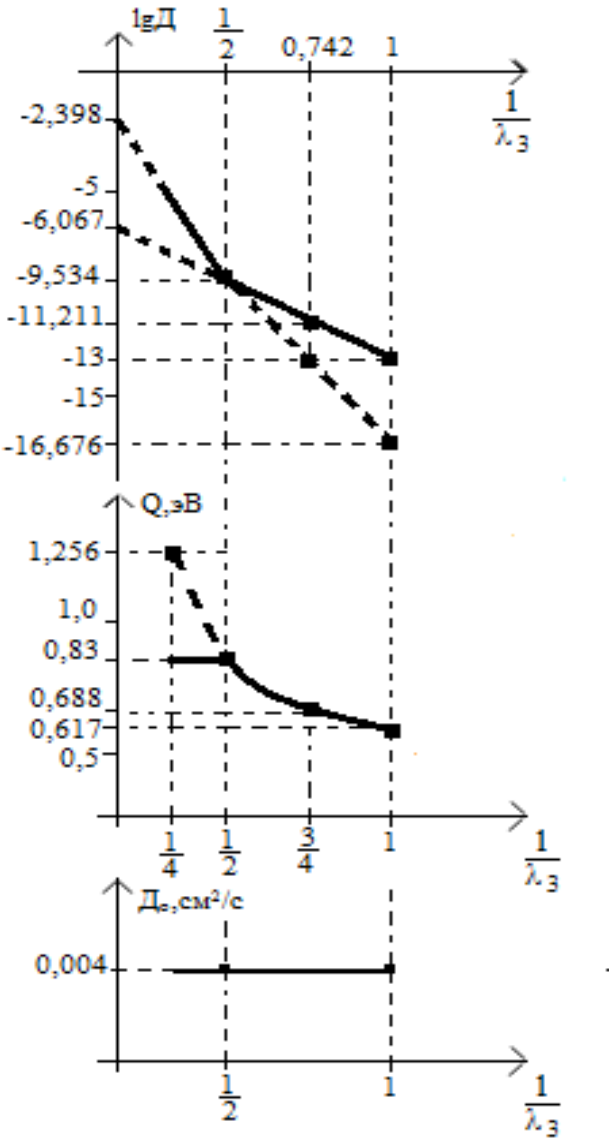


Рисунок 2.21 – Графики функциональных зависимостей «излом» от температуры

При этом отсутствие в формуле Аррениуса жесткой привязки к конкретному механизму диффузионного процесса позволяет и в случае отклонений абстрагироваться от конкретных физических механизмов их реализации и ограничиться формальным подходом к описанию. Вместе с тем такой подход предоставляет формальную базу для последующего ее согласования с физической теорией на основе результатов нацеленных на это экспериментальных исследований.

2.4 Физико-химические закономерности формирования диффузионного дискретного оксидного слоя

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;

Проведенный ранее обзор характера и природы отказов инструмента свидетельствует о большой роли локального диффузионного покрытия на долговечность режущего инструмента и детали, причем, как было показано выше, при повышении термомеханических нагрузок на контактные площадки инструмента роль ячеистости покрытия возрастает, повышая долговечность инструмента [67, 68, 69]. Поэтому в настоящей работе наибольшее внимание уделено роли локального диффузионного покрытия и особенностям его формирования.

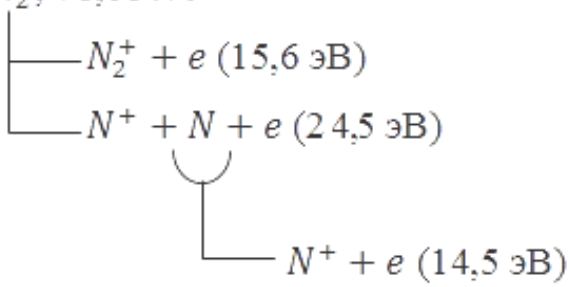
Значительное упрощение плазменных методов нанесения покрытия достигается использованием газового разряда при атмосферном давлении, в данном случае путем диффузионного насыщения поверхности ионами, получаемыми активацией воздушного потока униполярным коронным разрядом.

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.

Основу ионной активации воздуха составляют:

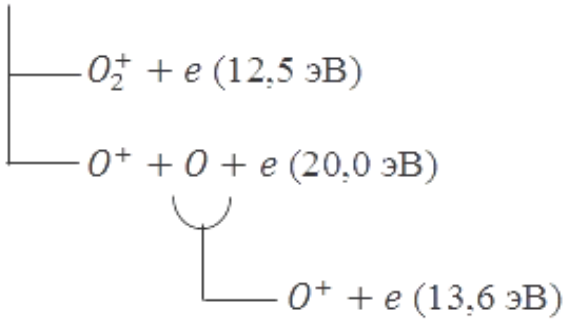
– процессы ионизации с образованием положительных ионов (в скобках указаны пороговые энергии ионизации):

1) N_2; 78,084%



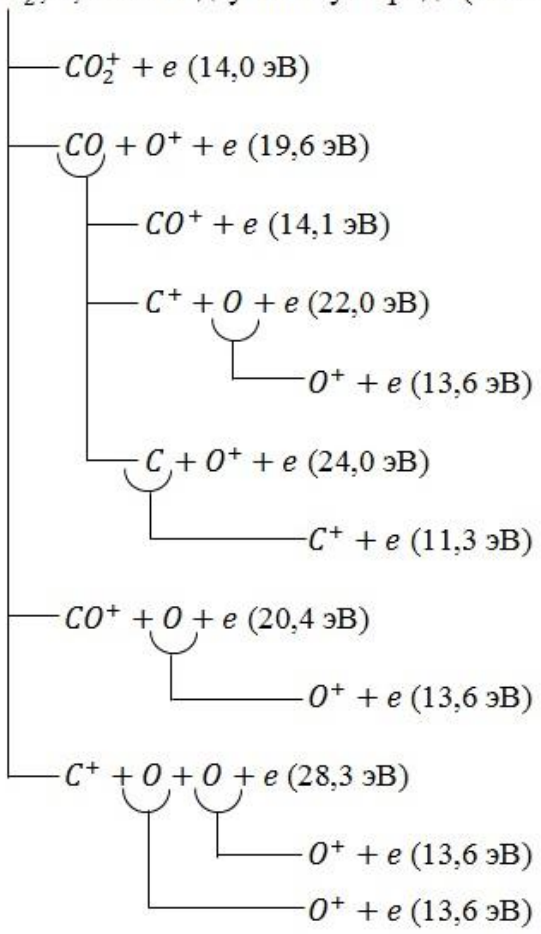
$(N_2, N;\ N_2^+, N^+)$

2) O_2; 20,9476%



$(O_2, O;\ O_2^+, O^+)$

3) CO_2; 0,0314% - двуокись углерода (CO – окись углерода)



$(CO_2, CO, C, O;\ CO_2^+, CO^+, C^+, O^+)$

– процессы электронного сродства с образованием отрицательных ионов (в скобках приведены примеры высвобождаемой энергии сродства):

$O_2 + e = O_2^-$ (0,45 эВ)

$O + e = O^-$ (1,46 эВ)

$CO_2 + e = CO_2^-$

$CO + e = CO^-$

$C + e = C^-$ (1,26 эВ)

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. Это 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.

Кроме положительных ионов дрейфовая зона разрядного промежутка содержит как не прореагировавшие молекулы воздуха, так и зарядово-нейтральные продукты газового разряда. К числу последних относятся, например, молекулы озона O_3 и перекиси водорода H_2O_2, являющиеся, вследствие наличия избыточного, соответственно сравнительно с O_2 и H_2O, атома кислорода, сильными окислителями, легко отдающими свой лишний атом. Присутствие в непосредственной близости от работающей установки таких химически активных продуктов ее деятельности способно оказывать не только негативное воздействие на здоровье оператора, при превышении норм ПДК, но и приводить к воспламенению горючих элементов окружения.

Образование молекул O_3 и H_2O_2 обусловлено химическими реакциями в ходе диссоционно-рекомбинационных столкновений с потреблением энергии газового разряда. Процессы образования и разложения озона,

рассматриваются, с точки зрения взаимных преобразований между двумя системами. Одна из которых состоит из трех грамм-молекул кислорода, а другая из двух грамм-молекул озона, осуществляемых с участием двух грамм-молекул так называемого третьего тела X (например, это могут быть молекулы опять же кислорода, или азота), выступающих в роли регуляторов переходов между возбужденными и стабильными состояниями озона, соответственно характеризуемыми стандартной энтальпией образование озона (142,5 кДж/моль) и энергией диссоциации связи O – O_2 (106,7 кДж/моль). Эти процессы могут быть описаны следующими последовательностями реакций:

$3O_2 + 2X \rightarrow (2O - 498,4) + 2O_2 + 2X = 2\ \{O + O_2 + X\} - 498,4 \rightarrow 2\ \{[O_3^* - 142,5] + X\} - 498,4 \rightarrow 2\ \{[(O_3 + 35,8) - 142,5] + [X^* - 35,8]\} - 498,4 = 2\ \{[O_3 - 106,7] + [X^* - 35,8]\} - 498,4 = \{2O_3 + 2X^* - 285\} - 498,4$

– эндотермический (с поглощением энергии) цикл образования озона;

$2O_3 + 2X^* \rightarrow 2\{[O_3^* - 35,8] + [X + 35,8]\} \rightarrow 2\{[(O_2 + O + 142,5) - 35,8] + [X + 35,8]\} = 2\{[O_2 + O + 106,7] + [X + 35,8]\} = \{2O_2 + 2X + 285\} + 2O \rightarrow \{2O_2 + 2X + 285\} + (O_2 + 498,4) \rightarrow \{3O_2 + 2X + 285\} + 498,4$

– экзотермический (с выделением энергии) цикл разложения озона.

где: *– возбужденное состояние.

Приведенная схематика носит условно сбалансированный характер с указанием только численных значений энергетических составляющих в размерности кДж/моль, где 498,4 кДж/моль – молярная энергия диссоциации связи O – O; 35,8 кДж/моль = (142,5 – 106,7) кДж/моль.

Для атомно-молекулярной газовой среды с наличием O и O_2 более краткой формулировкой процессов образования и разложения озона служит

$O + O_2 \leftrightarrow O_3 - 142,5$ кДж/моль,

не содержащая компоненты X ввиду ее посреднической («скрытой») ролевой функции. Там не менее поступление озона из открытого газоразрядного промежутка в окружающую среду зависит от X – компоненты и определяется превышением интенсивности образования молекул озона в стабильном

состоянии над интенсивностью перевода их возбужденное состояние с последующим распадом. Предельно допустимая концентрация (ПДК) содержания озона в воздухе определена санитарными нормами как 10^{-5}% (=10^{-7}), что при стандартной плотности атмосферы ρ_c = 0, 123 · 10^7 мг/м^3 соответствует величине 0,123 мг/м^3.

В качестве основного источника образования атмосферного пероксида водорода служит рекомбинация гидропероксидных радикалов [70]

$$HO_2 + HO_2 \rightarrow O_2 + H_2O_2, \qquad (2.49)$$

которые образуются, например, в реакциях гидроксильного радикала OH с O_3:

$$OH + O_3 \rightarrow HO_2 + O_2. \qquad (2.50)$$

В тропосфере концентрация OH определяется величиной [70] (0,5 - 5) · 10^6 1/см^3, составляющей (1,96 – 19,6) · 10^{-12} % от стандартной концентрации n_C = 25,471 · 10^{18} 1/см^3. Применительно к газовому разряду образование двух гидроксильных радикалов происходит в реакции [71]

$$H_2 + O_2 \rightarrow 2OH, \qquad (2.51)$$

что, с учетом вышесказанного, уже дает основания для предположения о наличии H_2O_2 в продуктах коронного разряда, порождаемого последовательностью реакций (2.51) → (2.50) → (2.49). Следует отметить, что реакция с участием двух радикалов OH:

$$OH + OH \rightarrow H_2O_2,$$

кажется весьма привлекательной для интерпретации механизма образования пероксида водорода в газовом разряде, не получила подтверждения при проведении исследовательских работ по ее обосновании для случая образования H_2O_2 при горении водорода [72].

Другим источником возникновения гидропероксидных радикалов могут служить реакции, аналогичные рассмотренным для случая образования озона и связанные с разложением молекулярного водорода и последующим объединением атомарного водорода с молекулярным кислородом [70]:

$H_2 \rightarrow 2H - 436$ кДж/моль,

$H + O_2 \rightarrow HO_2$.

Однако вне зависимости от конкретики реакций, приводящих в итоге к возникновению пероксида водорода H_2O_2, все они связаны с необходимостью наличия одной из основных исходных компонент – водорода, концентрация которой n_C (H_2) в воздухе значительно ниже концентрации кислорода n_C (O_2), являющегося основной исходной компонентой в образовании озона:

$$\frac{n_C(H_2)}{n_C(O_2)} = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{21} = 2{,}4 \cdot 10^{-6}.$$

Различного рода «водородные дополнения», например, от его содержания в атмосферном метане CH_4 (n_C (CH_4) = $2 \cdot 10^{-4}$ %), не оказывают существенного влияния на картину соотношения. Использование для предварительной сопоставительной оценки концентраций озона $n_{Г.Р.}(O_3)$ и пероксида водорода $n_{Г.Р.}$ (H_2O_2) в продуктах маломощного газового разряда допущения о доминирующей роли соотношения концентраций основных исходных компонент, приводит к выводу, что

$$\frac{n_{г.р.}(H_2O_2)}{n_{г.р.}(O_3)} \langle\langle 1,$$

т.е. выход H_2O_2, сравнительно с выходом O_3, ожидаемо, крайне незначителен. В этой связи дальнейшее рассмотрение механизмов образования и разложения пероксида водорода, применительно к коронному газовому разряду требующее дополнительных исследований, выходящих за рамки темы диссертации, не представляется целесообразным.

Тем не менее, в дополнение к вышесказанному, можно отметить, что в короне газового разряда возможны и другие зарядово-нейтральные реакции, например, предположительно, такие как:

$N_2 \leftrightarrow N + N - 945$ кДж/моль,

$O_2 \leftrightarrow O + O - 498$ кДж/моль,

$N_2 + O_2 \leftrightarrow 2NO - 181$ кДж/моль,

$CH_4 \rightarrow C + 2H_2 - 75$ кДж/моль,

$CO_2 + C \rightarrow 2CO - 172$ кДж/моль,

$CO \leftrightarrow C + O - 1073$ кДж/моль,

$C + C \leftrightarrow C_2 + 618$ кДж/моль,

$NO_2 + NO_2 \leftrightarrow N_2O_4 + 57$ кДж/моль,

$NO_2 + NO \leftrightarrow N_2O_3 + 42$ кДж/моль,

$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2 + 113$ кДж/моль.

На рисунке 2.22 схематично представлена физико-химическая модель технологии формирования диффузионного дискретного оксидного слоя. Ионная активация воздуха положительной короной установки увеличивает хемосорбционную активность, причем интенсификация процесса оксидирования приповерхностного слоя сохраняет функцию блокировки процесса азотирования.

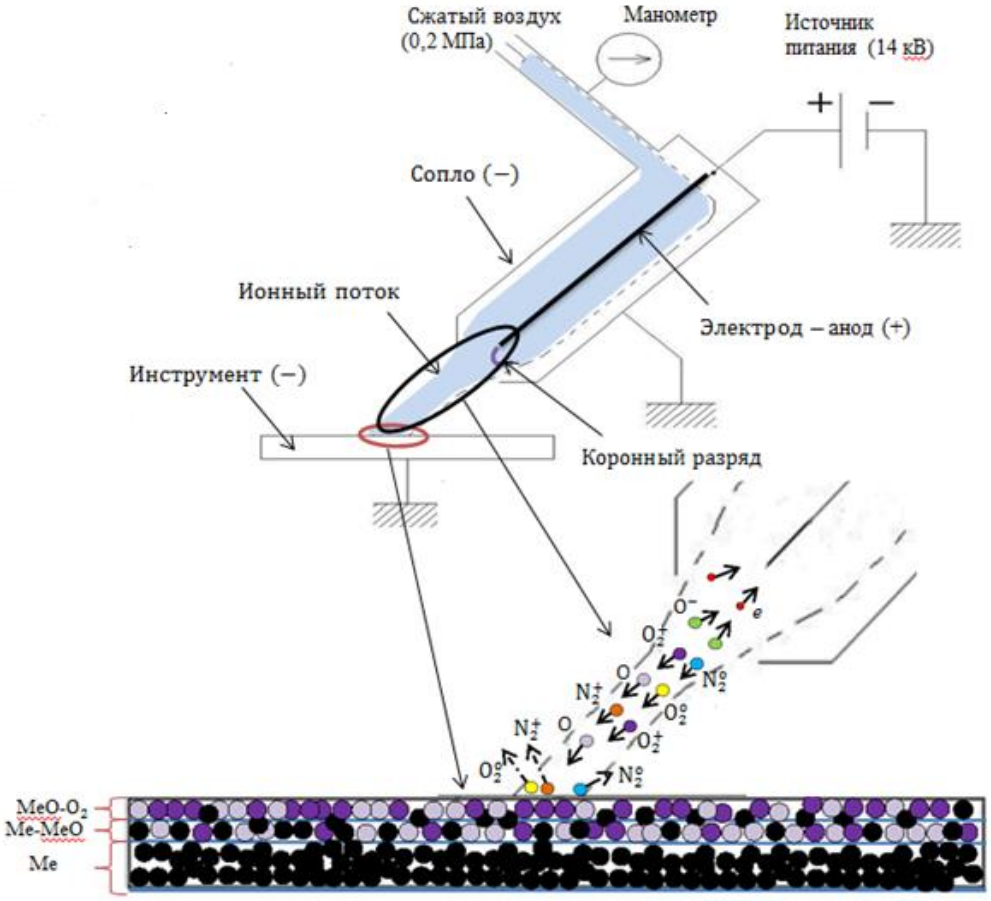


Рисунок 2.22 – Физико-химическая модель формирования диффузионного дискретного оксидного слоя

Блокировка процесса образования нитридов ионами кислорода на электроде установки способствует нейтрализации положительных ионов азота воздуха. Распыление нейтрализованной азотной составляющей ионизированного потока и бомбардировочной очисткой поверхности, в свою очередь, облегчает диффузию ионов (или атомов) кислорода в поверхностный слой с образованием диффузионного внутреннего покрытия оксидного типа.

Металл аккумулирует энергию, внутренняя энергия поверхностного слоя существенно возрастает. Эта скрытая энергия распределена в металле неравномерно, и, в основном, сконцентрирована в дефектах кристаллической решетки.

Молекулы кислорода внедряется в кристаллическую решетку металла и образует твердые растворы и, тем самым, повышаются твердость и прочность поверхностного слоя инструментального материала.

Поверхностный слой металла быстро заполняется хемосорбированным окислителем и образуется тонкий слой окисленного металла. При пониженных температурах после хемосорбированного кислорода за счет ванн-дер-ваальсовых сил может возникнуть и физическая адсорбция молекул кислорода. Если между металлом и кислородом есть химическое сродство (оксид термодинамически стабильный), то пленка, состоящая из хемосорбированного кислорода, превращается в оксидную пленку. Металл и кислород в оксидной пленке создают ионную связь. В таком случае очень быстро возникает слой хемосорбированного кислорода и в то же время в оксидах формируется значительное электрическое поле. На поверхности раздела Me-MeO образуются катионы, а на поверхности раздела $MeO-O_2$ образуются анионы кислорода. Электрическое поле способствует миграции катионов к поверхности раздела $MeO-O_2$. Таким образом, любой кристалл, находящийся при температуре, отличной от нуля, всегда будет содержать определенное число дефектов структуры. Металл переходит в термодинамически неустойчивое неравновесное состояние с повышенной внутренней энергией. При повышении температуры оксиды переходят в

более стабильное состояние, соответствующее более высокому содержанию кислорода в металле.

Повышение содержания кислорода в поверхностном слое в форме твердого раствора внедрения сопровождается увеличением удельного объема, формированием остаточных сжимающих напряжений, повышением твердости и износостойкости. Этим объясняется упрочнение материалов при их обработке.

Для оценки активационной эффективности короны в качестве поставщика однозарядных положительных аэронов воспользуемся понятием коэффициента ионизации K_i^+, определив его как отношение усредненной концентрации образуемых положительных ионов n_i^+ к концентрации стандартной атмосферы $n_C = 25{,}47 \cdot 10^{24}$ м$^{-3}$:

$$K_i^+ = \frac{n_i^+}{n_C}.$$

С точки зрения регистрируемых токов коэффициент K_i^+ удобно оценивать в виде отношения плотностей токов, создаваемых направленным движением однородного воздушного потока со скоростью υ в случаях его частичной и полной ионизации:

$$K_i^+ = \frac{j_i^+}{j_C^+},$$

где $j_i^+ = e \cdot n_i^+ \cdot \upsilon$, $j_C^+ = e \cdot n_i^+ \cdot \upsilon$, (2.52)

Такого рода оценочная идеализация дает представление о порядке величины K_i^+.

В таблице 2.13 в качестве примеров приведены численные значения j_C^+, реализуемые по (2.52) при различных значениях υ.

Таблица 2.13 – Численные значения плотностей тока, создаваемых одномерным движением плотностью ионизированного воздушного потока

υ, м/с	100	200	300	400	500	1000
j_C^+, мкА/см^2	$4{,}08 \cdot 10^{10}$	$8{,}16 \cdot 10^{10}$	$12{,}24 \cdot 10^{10}$	$16{,}32 \cdot 10^{10}$	$20{,}4 \cdot 10^{10}$	$40{,}8 \cdot 10^{10}$

Огромные значения j_C^+ из таблицы 2.13 свидетельствуют о заведомой малости коэффициента K_i^+, если j_i^+ ~ сотен мкА/см^2:

$K_i^+ \sim 10^{-9} – 10^{-8} = (10^{-7} – 10^{-6})$ %.

При плотности стандартной атмосферы ρ_C = 1,225 10^6 мг/м^3 для ожидаемых концентраций и плотностей положительных ионов соответственно получаем:

$n_i^+ \sim K_i^+ \cdot n_C = (2{,}547 – 25{,}47) \cdot 10^{16}$ 1/м^3,

$\rho_i^+ \sim K_i^+ \cdot \rho_C = (1{,}23 – 12{,}3) \cdot 10^{-3}$ мг/м^3.

Определение плотности заряда τ_i^+:

$\tau_i^+ = e \cdot n_i^+ = e \cdot K_i^+ \cdot n_C = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot (2{,}547 – 25{,}47) \cdot 10^{16} = (0{,}41– 4{,}1) \cdot 10^{-2}$ Кл/м^3 может быть интерпретировано в контексте наличия у каждой частицы воздуха эффективного заряда

$R_{эф} = e \cdot K_i^+ = (1{,}6 – 16) \cdot 10^{-28}$ Кл,

поскольку

$\tau_i^+ = e \cdot n_i^+ = e_{эф} \cdot n_C$.

При стандартной массе частицы воздуха

$$m_c = \frac{\rho_C}{n_C} = \frac{1{,}225}{25{,}47 \cdot 10^{24}} = 48{,}1 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

(массы для сравнения: 1 а. е. м. = 1,66 · 10^{-27} кг; m(N_2) = 2 · 14 а. е. м. = 46,5 · 10^{-27} кг; m(O_2) = 2 · 16 а. е. м. =53,1 · 10^{-27} кг; 0,78 · m(N_2) + 0,21· m(O_2) = 47,4 · 10^{-27} кг) на нее приходится удельный заряд q_C^+, равный

$$q_C^+ = \frac{e_{эф}}{m_C} = (3{,}33 – 33{,}3) \cdot 10^{-3} \text{ Кл/кг}.$$

В качестве сравнения отметим, что для промышленных порошковых пневмоэлектрических распылителей с коронирующими электродами, используемых для напыления покрытий, требованием является наличие удельного заряда у напыляемых частиц не менее 0,7 · 10^{-3} Кл/кг [60].

С точки зрения представления вольт-амперной характеристики коронирующего электрода обобщением вида [60].

$$I = G \cdot V \cdot (V - V_K) \qquad (2.53)$$

любой конкретный режим с напряжением ($V \rangle V_K$) и током I формально может быть реализован различными взаимосвязанными значениями зависящего от геометрии межэлектродного промежутка коэффициента G, мкА/кВ^2 и напряжения зажигания короны V_K, определяемыми, например, зависимостью

$$G(V_K) = \frac{I}{V \cdot (V - V_K)}. \qquad (2.54)$$

В таблице 2.14 численно и на рисунке 2.23 графически зависимость (2.54) определена для условного рабочего режима с V = 15 кВ и I = 400 мкА.

Таблица 2.14 – Численные значения коэффициента межэлектродного промежутка и напряжения зажигания корны

V_K, кВ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
G, мкА/кВ^2	1,778	1,905	2,051	2,222	2,424	2,667	2,963	3,333	3,810	4,444
V_K, кВ	10	12	14	15						
G, мкА/кВ^2	5,333	8,889	26,667	∞						

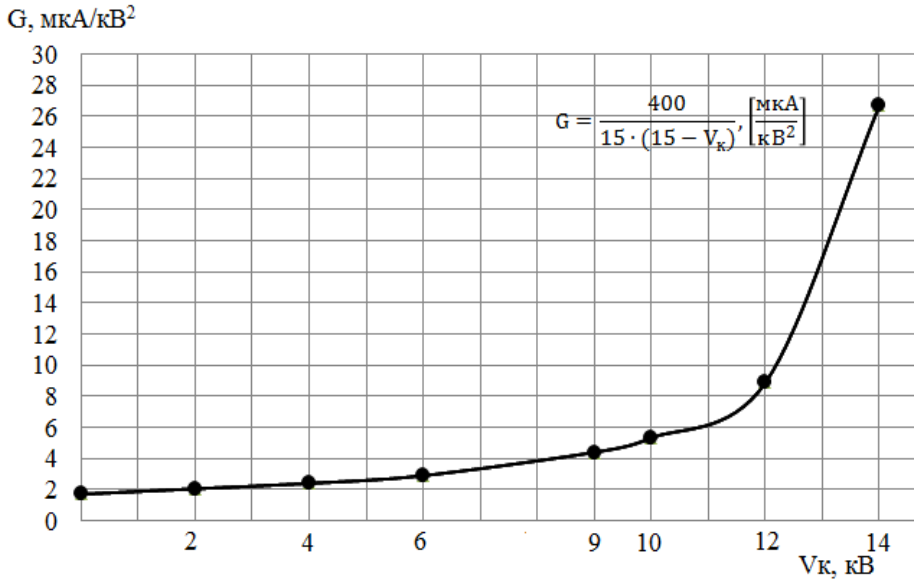


Рисунок 2.23 – Пример графического представления зависимости $G(V_K)$, формально согласовывающей возможные значения G и V_K, обеспечивающие реализацию режима с I = 400 мкА при V = 15 кВ

Из графика, (см. рисунок 2.23) по известному из эксперимента или оценочного, с использованием (2.6), расчета значению $V_К$ легко находится соответствующее ему значение коэффициента G, единое для всех режимов на вольт-амперной характеристике. Таким образом, соотносимое с реальной системой электродов аналитическое выражение для вольт-амперной характеристики (2.53) коронного разряда обретает числовую конкретику на основе использования оценочного значения $V_К$ и измерения тока коронирующего электрода при напряжении, выбранном в качестве рабочего, путем сопоставления характеристик самого покрытия в различных режимах его нанесения. Например, значению $V_К$ = 4кВ по данным из таблицы 2.14 соответствует значение G = 2,424 мкА/кВ^2 и выражение для вольт-амперной характеристики принимает вид I = 2,424 · V · (V – 4) мкА с численным отображением в таблице 2.15 и графическим на рисунке 2.24. С целью сопоставления в таблице 2.15 также приведены значения I для $V_К$ = 3кВ и $V_К$ = 5кВ с соответствующими им значениями G = 2,222 мкА/кВ^2 и G = 2,667 мкА/кВ^2, позволяющие оценить влияние изменений в значениях $V_К$ на величину тока I для V ≠ 15кВ (теоретическое согласование значений G и $V_К$, осуществленное для $V_К$ = 15кВ, обеспечивает при этом напряжении неизменность расчетного значения I = 400 мкА вне зависимости от $V_К$).

Отметим, что в определениях вольт-амперных характеристик (2.1) и (2.53) между безразмерным коэффициентом α из (2.1) и размерным коэффициентом G [мкА/кВ^2] из (3.25) реализуется формальное численное равенство

$$\alpha = G \cdot L_{ЭФ}^2 ,$$

где: $L_{ЭФ}$ [мм] – эффективное значение межэлектродного расстояния. Так, значениям G = 2,222; 2,424 и 2,667 мкА/кВ^2 при $L_{ЭФ}$ = 10 мм отвечают значения α = 2,222; 2,424; 2,667.

Таблица 2.15 – Численные значения вольт-амперной характеристики от межэлектродного промежутка

V, кВ		3	4	5	6	7	9	12	15	16	18
I,мкА	$V_К$=3кВ, G=2,22мкА/кВ^2	0	8,89	22,22	40	62,22	119,99	239,98	4 00	462,18	599,9
	$V_К$=3кВ, G=2,22мкА/кВ^2	0	0	12,12	22,09	50,90	109,08	237,70	400	465,41	610,8
	$V_К$=3кВ, G=2,22мкА/кВ^2	0	0	0	16	37,34	96,01	224,03	400	469,39	624,08

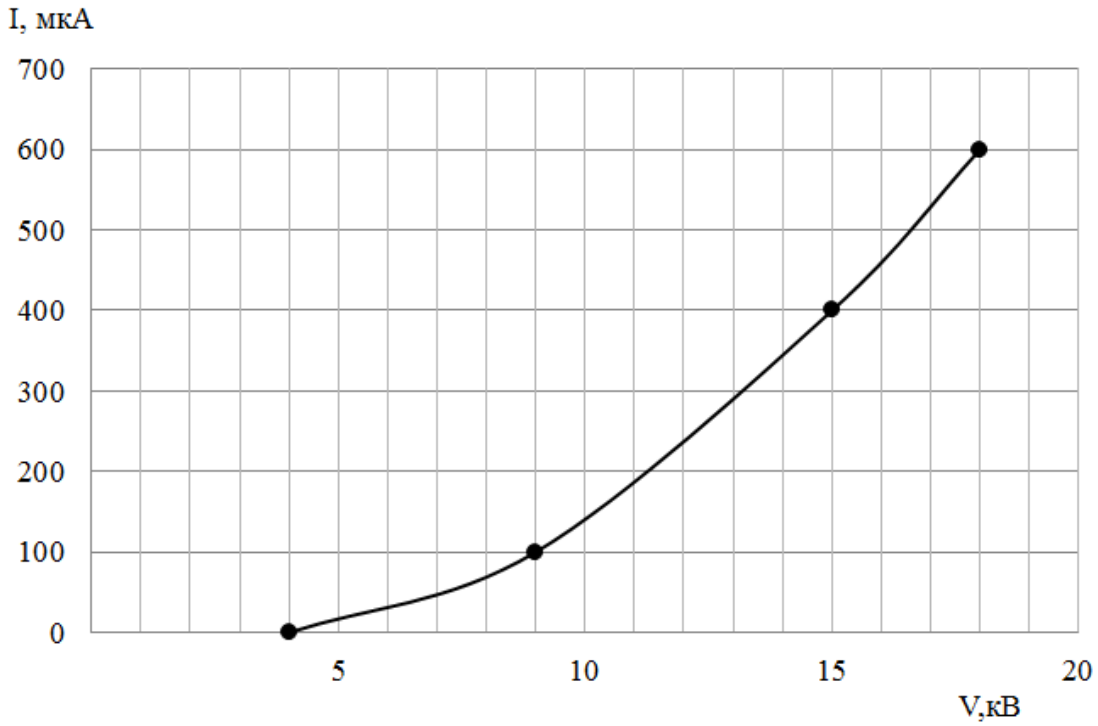


Рисунок 2.24 – Пример графического представления вольт-амперной характеристики

Поскольку основным объектом исследования является не непосредственно коронный разряд, а свойства образуемого с его помощью покрытия, то именно они служат критерием выборки рабочего режима нанесения. Это в значительной мере снимает проблемы, характерные для токовых измерений в условиях положительной короны. Различного рода нестабильности, присущие горению положительной короны. Визуально они проявляются как динамические неравномерности свечения в виде исходящих с острия коронирующего электрода светящихся нитей – стримеров,

вспышечные режимы свечения и т.п., приводят к появлению токового «дребезга». При некоторых условиях переходящего в обладающие постоянной составляющей периодические импульсы с частотами до 10 кГц [59], даже при неизменности разрядного напряжения. Влияние токовых нестабильностей от предначальных стримеров, усиливаемое вкладом от шероховатостей коронирующей части поверхности игольчатого электрода, в свою очередь может приводить к разбросам в экспериментально определяемых значениях напряжения зажигания короны $V_К$.

2.5 Разработка методики и критерии оценки долговечности режущего инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем

На основе полученных результатов теоретической модели дискретного оксидного слоя и сплошного покрытия определим долговечность режущего инструмента по Журкову С.Н., т.е. определим временной интервал работы режущего инструмента обусловленного действием термофлуктуационного механизма разрушения нагруженных межатомных связей. В работах [51, 62] приведены примеры модификации формулы Журкова С.Н., для расчета долговечности режущего инструмента в различных условиях их эксплуатации. Они привели к радикальному изменению взглядов на физическую природу прочности твердых тел и к возможности приведения количественных оценок влияющих на прочность физических величин на основе функциональных взаимосвязей, отображаемых исходным вариантом формулы Журкова С.Н.

$$t_{д\max} = t_о \exp\frac{U_o}{kT},$$

при $$t_д = t_{д\max} \exp\left(-\frac{\Omega\sigma}{kT}\right)$$

где: σ – приложенное напряжение, U_0 – энергия активации процесса разрушения (требуемая для первичного акта разрушения в виде разрыва межатомной связи и обычно отождествляемая с энергией сублимации в

пересчёте на одну межатомную связь), Ω - активационный объём (объём области локализации первичного акта разрушения с учётом влияния на него дефектности материала изделия) k – постоянная Больцмана, Т – абсолютная температура по Кельвину, $\tau_o \approx 10^{-13}$ с (время, считающееся достаточным для разрыва межатомной связи). Исходя из допущения, что для сплошного покрытия и дискретного оксидного слоя все величины, кроме напряжения σ, имеют одно и то же значение.

Обозначив долговечность диффузионного дискретного оксидного слоя $t_{дпs}$, а долговечность сплошного покрытия – $t_{дп}$, тогда:

$$t_{дп} = t_{дп\,max} \cdot \exp\left(\frac{\Omega_п \sigma_п}{kT}\right),$$

причем в рамках принятого допущения

$$t_{дп} = t_{дпs\,max}$$

Получив из теоретической модели, эффективное напряжение диффузионного дискретного оксидного слоя

$$\sigma_{пs} = \sigma_п - \frac{Ax_1}{1+Ax_1} \cdot \sigma_п,$$

Определим долговечность диффузионного дискретного оксидного покрытия:

$$t_{дпs} = t_{дпs\,max} \exp\left(-\frac{\Omega_п \sigma_{пs}}{kT}\right) = t_{дп\,max} \exp\left(-\frac{\Omega_п \sigma_п}{kT}\right) \cdot \exp\left(\frac{Ax_1}{1+Ax_1} \cdot \frac{\Omega_п \sigma_п}{kT}\right) =$$

$$= t_{дп} \cdot \exp\left(\frac{Ax_1}{1+Ax_1} \cdot \frac{\Omega_п \sigma_п}{kT}\right)$$

Или:

$$\frac{t_{дпs}}{t_{дп}} = \left(\exp\frac{\Omega_п \sigma_п}{kT}\right)^{\frac{Ax_1}{1+Ax_1}} = \left(\frac{t_{дп\,max}}{t_{дп}}\right)^{\frac{Ax_1}{1+Ax_1}} \geq 1$$

Согласно кинетической теории прочности процесс разрушения носит термофлуктуационный характер, когда «главным действующим фактором при разрушении оказывается тепловое движение атомов, порождающее энергетические флуктуации, тогда как внешняя сила обеспечивает

направленность разрывного действия флуктуаций, без чего не может развиваться разрушение» [51, 62]. Необходимость перехода от статической концепции прочности к кинетической прослеживается при рассмотрении явления износа, трактуемого как вид разрушения [51], интенсивность которого, зависит от твердости, от энергоемкости инструментального материала [51]. Таким образом, в контексте формулы Журкова С.Н. характеристикой энергоемкости инструментального материала по отношению к износу служит эффективная молярная энергия активации $U_{эф}$, определяемая разностью [50]:

$$U_{эф} = U_o - \Omega\sigma,$$

где: $U_{эф}$ - эффективная молярная энергия активации за счет внешних и внутренних сил; U_o - 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 $t_д$ с периодом его стойкости из формулы Журкова С.Н. получаем выражение для эффективной молярной энергии активации $U_{эф}$:

$$U_{эф} = \frac{RT}{0{,}434} \lg\left(\frac{T_{СТ}}{\tau_o}\right)$$

где: $\tau_o \approx 10^{-13}$ 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 модификационной 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.

В таблице приведены результаты исследований двадцати твердосплавных четырехгранных пластинок IC50M с различными вариантами покрытий. Расчеты параметра среднего значения температуры режущей кромки инструмента по Кельвину Т приблизительны, т.к. не учитывают изменение мощности тепловых источников от трения по контактным площадкам передней и задней поверхностей. Не учитывается зависимость дифференциального параметра для нано-слоев. Тем не менее, в первом приближении данные, представлены в таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Вариации эффективной молярной энергии активации $U_{эф}$ при поперечном точении стали 40Х (НВ220) резцом с твёрдосплавной пластиной IC50M: v = 190 м/мин; s = 0,4 мм/об; t = 2мм

Инструментальный материал	$T_{ст}$, мин	$h_з$, мм	Т, К	$U_{эф}$, кДж/моль
IC50M – сплошное покрытие (TiN)	2,08	0,08	973	280,973
IC50M –дискретный оксидный слой (MeO-O_2)	2,52	0,074	973	282,779
IC50M – без покрытия	2,08	0,077	975	281,551

Полученные данные позволяют отметить следующее, что чем больше эффективной молярной энергии активации $U_{эф}$, тем период стойкости режущего инструмента выше. Таким образом, $U_{эфп} > U_{эф}$ эффективная молярная энергия активации у режущего инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем больше, чем у режущего инструмента со сплошным покрытием (TiN).

Выводы по главе:

1. Разработана концепция формирования диффузионного дискретного оксидного слоя на режущие инструменты.

2. Разработана теоретическая модель образца с диффузионным дискретным оксидным слоем, позволяющая, с точки зрения концепции двухпредельности («сплошное покрытие – полное отсутствия покрытия»), оценивать влияние композиции из областей с покрытием и без покрытия образующих ячеистую структуру на модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Показано, что использование ячеистости приводит к уменьшению эффективного значения модуля Юнга образца, сравнительно с образцом со сплошным покрытием, что приводит к улучшению его пластических свойств, способствующих релаксации напряжений. Также показано, что характер влияния дискретного оксидного слоя на прочностные свойства плоского образца при растяжении, в рамках сделанных идеализаций и допущений, полностью определяется влиянием на прочностные свойства одной элементарной ячейки.

Установлено, что диффузионный дискретный оксидный слой приводит к увеличению его долговечности за счет снижения растягивающих напряжений в областях с покрытием.

3. Разработана методика и критерии оценки долговечности режущего инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем.

4. Определена долговечность режущего инструмента и определен временной интервал работы режущего инструмента обусловленного действием термофлуктуационного механизма разрушения нагруженных межатомных связей. Согласно экспериментальным данным эффективная молярная энергия активации $U_{эф}$ с дискретным оксидным слоем больше, чем эффективная молярная энергия активации $U_{эф}$ с ионно-плазменным покрытием (TiN) на 0,9%, следовательно, долговечность режущего инструмента выше примерно в 1,5-2раза.

5. Установлена 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.

6. Рассмотрены особенности диффузионного процесса при формировании дискретного оксидного слоя.

7. Разработаны предпосылки формирования дискретного оксидного слоя на металлическую основу.

8. Рассмотрены физико-химические закономерности формирования диффузионного дискретного оксидного слоя.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИИЙ

3.1 Методика проведения процесса формирования диффузионного дискретного оксидного слоя

Для формирования диффузионного дискретного оксидного слоя на режущий инструмент был использован положительный униполярный коронный разряд, формируемый в привершинной области игольчатого электрода.

Схема проведения работ по отработке технологии представлена на рисунке 3.1.

Разработано несколько вариантов технологий нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя на режущий инструмент, в частности изготовленный из быстрорежущей стали или из твердого сплава, а также на титановые образцы детали, которые можно применять в одной технологической установке.

Формирование диффузионного дискретного оксидного слоя, получаемого воздействием на основу активированным воздушным потоком, проходящим через коронный разряд, с условно выделенными границами послойной диффузионной самоорганизации по схеме, (см. рисунок 2.10) производили на установке, в которую входит устройство для создания ионизированного воздушного протока «УИВ-1» и электромеханический блок. При формировании диффузионного дискретного оксидного слоя использовали специальный игольчатый анод с жесткой регламентацией. В качестве материала анода использовали вольфрам.

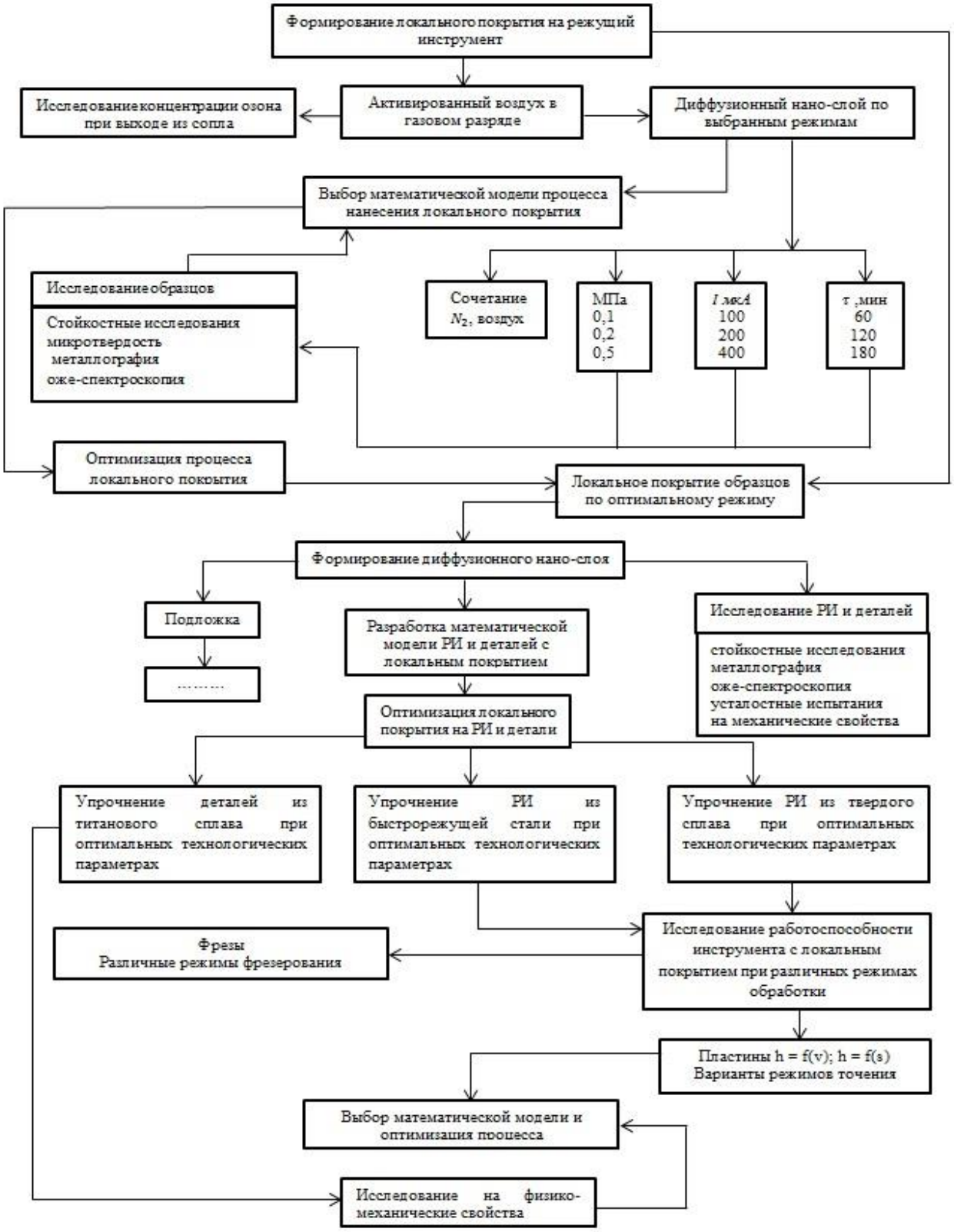


Рисунок 3.1 – Схема проведения исследований

Наиболее существенным преимуществом локального диффузионного дискретного оксидного слоя, сравнительно со сплошным покрытием,

является увеличение долговечности режущего инструмента по отношению к хрупкому разрушению его режущей кромки.

Формирование на поверхности режущей части инструмента жестких областей локальных диффузионных дискретных оксидных слоев, разделенных мягкими областями без покрытия, способствует увеличению ее пластических свойств и снижению напряжений в покрытии. Это приводит к уменьшению вероятности его разрушения, в том числе за счет наличия препятствий поверхностному распространению трещин в жестком покрытии, создаваемых мягкими промежутками без покрытия, разграничивающими области локальных покрытий. Снижение в ячеистом покрытии, рассматриваемом как целостная структура, включающая мягкие промежутки без покрытия, эффективного значения модуля упругости, сравнительно с его значением в сплошном покрытии, способствует релаксации напряжений.

Расположение образцов в проведенных экспериментах позволили получить информацию по оптимизации процесса формирования диффузионного дискретного оксидного слоя. Это дало возможность продолжить исследование с точки зрения «исследование кинетики изнашивания». В качестве образцов использовали - пластины квадратной формы 18х18х8мм Р6М5 с твердостью HRC62 и Р6М5К5 с твердостью HRC65, производства ОАО «МПО им. И. Румянцева» и пластины прямоугольной формы 11,6х9,5х4,0мм производства компании «ISKAR»: IC50M, IC3028, IC9015, IC9025, а также концевые фрезы ВК10ХОМ R<1° Z = 6 и Z = 4 производства АО «НПЦ газотурбостроения «Салют». Кроме режущего инструмента был обработан «образец детали» из титанового сплава ВТ3–1. После нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя, режущий инструмент (твердосплавные и быстрорежущие пластины, твердосплавные фрезы) исследовали на долговечность при различных режимах обработки, а «образец детали» из титанового сплава после нанесения диффузионного покрытия исследовали на механические свойства.

3.2 Методы исследования структуры и состава диффузионного дискретного оксидного слоя

Как было, установлено на выходные параметры процесса нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя наибольшее влияние оказывает ток коронного разряда, а также давления сжатого воздуха. Для исследования влияния указанных параметров нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя и получения оксидного слоя проведены исследования, результаты которых представлены в этом разделе.

Состав диффузионного дискретного оксидного слоя и распределение элементов по глубине рассеяния определяли на установке «Сокол-3», в институте технологии микроэлектроники РАН (ИПТМ РАН), (см. рисунок 3.2)

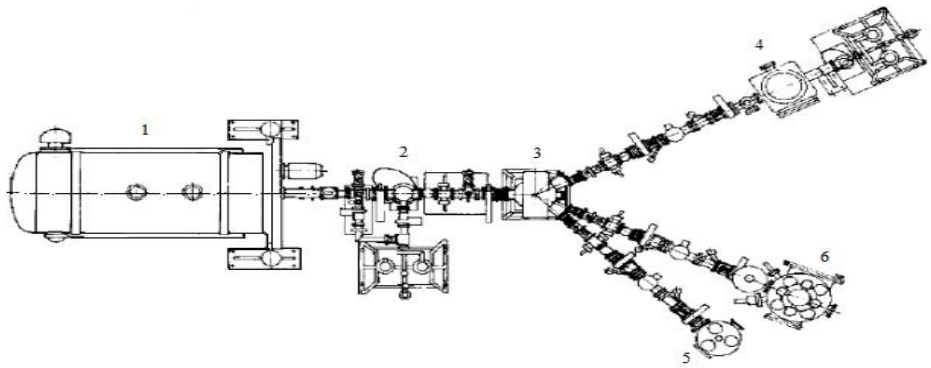


Рисунок 3.2 – Аналитический комплекс «Сокол-3»: 1 – ЭСУ-2; 2 – ионопровод; 3 – аналитический магнит; 4 – камера РОР; 5 – камера для измерений ядер отдачи; 6 – камера для рентгенофлуоресцетных и оптико-люминесцентных измерений.

Для этого были приготовлены шлифы двух типов с «косым» срезом и «ступенчатой» шлифовкой. «Ступенчатые» шлифы имели высоту ступеньки $(3-5)\cdot 10^{-5}$ м.

Шлифы изготовляли по единой методике. Первоначально они заливались эпоксидной смолой в металлические формы (кольца из закаленной стали ШХ-15 с HRCэ 40÷42) и предварительно сошлифовывали

до нужного сечения на плоскошлифовальном станке кругом 27020 - 0133 ГОСТ 16167 - 80 АСР 80/63 МА 61 - 100 с t = 0,01 мм, $S_{прод}$ = 0,1мм/дв.ход. Затем шлифы доводили с использованием алмазных паст - АСМ 64/ 140, АСМ 40/28, АСМ 20/14, АСМ 10/7, АСМ 3/2, нанесенных на плотный картон.

Ионопучковый аналитическом комплекс «Сокол-3» работает по методу ионопучковой диагностики планарных микро и наноструктур, в которых используются потоки ионов H+, D+, He+ средних энергий 0,3÷3,5 МэВ.

Взаимодействие этих частиц с электронной подсистемой твердых тел вызывает их относительно равномерное торможение в материале. Столкновение с ядрами атомов, составляющих твердотельную мишень, напротив, приводит к резкому изменению энергии налетающих ионов, а иногда просто к их исчезновению с появлением частиц другого типа. Все эти явления с успехом используются для неразрушающего количественного контроля состава и структуры твердотельных мишеней [74]. В результате торможения ионов в веществе возбуждается его электронная подсистема. Анализ радиационной релаксации этого возбуждения, на основе регистрации выхода оптической составляющей, позволяет судить о зонной структуре исследуемого соединения. Фиксация спектров рентгеновской радиации, также являющейся частичным результатом такой релаксации, предоставляет условия для количественной элементной диагностики приповерхностного слоя мишени [74]. При этом толщина диагностируемого слоя будет определяться двумя факторами: глубиной проникновения заряженных частиц в материал и коэффициентом линейного поглощения анализируемого рентгеновского излучения в этом материале.

Взаимодействие быстрых заряженных частиц с ядрами атомов, составляющих анализируемую мишень, прежде всего, характеризуется их кулоновским отталкиванием. Это взаимодействие хорошо аппроксимируется теоретически и является базовым для спектроскопии резерфордовского обратного рассеяния ионов. На основе математической обработки спектров резерфордовского обратного рассеяния, полученных при больших углах

рассеяния ионов $\theta \geq 160°$, удается рассчитать распределение элементов по глубине мишени для толщины ее поверхностного слоя около 1 мкм с точностью 5 ÷ 7%, а для толщин 10 ÷ 20мкм – с точностью около 10% [74]. Метод резерфордовского обратного рассеяния крайне важен для количественной аналитической диагностики в микро и нанопленочной планарной технологии вследствие абсолютности получаемых на его базе данных. В тоже время экспериментальное применение этого метода характеризуется некоторыми особенностями, связанными с наличием так называемого «не резерфордовского вклада» в рассеяние ионов.

Важным аспектом взаимодействия пучков быстрых заряженных частиц с твердым телом являются прямые резонансные и пороговые ядерные реакции. Они представляются крайне эффективным аналитическим средством для количественной моноэлементной изотопной диагностики исследуемых мишеней. Такая диагностика оказывается особенно эффективной для определения содержания в мишени легких элементов (B, C, F и др.). В тоже время необходимо иметь в виду относительность результатов измерений, выполненных с помощью ядерных реакций.

Специфическим направлением аналитического использования пучков заряженных частиц является количественная концентрационная диагностика содержания в веществе атомов водорода и гелия. Подобный уникальный анализ осуществляется на основе так называемого «метода ядер отдачи», который, как и метод резерфордовского обратного рассеяния, является абсолютным аналитическим методом [75]. Глубина анализа обычно не превосходит 1 ÷ 2 мкм.

Аналитическая элементная диагностика тонких покрытий, как правило, выполняется на ионопучковых комплексах, построенных на базе электростатических ускорителей ионов, поскольку ускорители этого типа характеризуются наименьшим разбросом энергии ионов в пучке на его выходе. Установки этого типа выдают ионные пучки с моноэнергетичностью на уровне 0,02%.

В состав ионопучкового аналитического комплекса помимо электростатического ускорителя входит вакуумный ионопровод с системой безмасленной высоковакуумной откачки, отклоняющий магнит и экспериментальные камеры, оснащенные гониометрической системой и системой регистрации рассеяния ионов и продуктов релаксации возбуждения, инициированного первичным пучком.

Рабочее давление в вакуумной системе ионно-аналитического комплекса обычно составляет $(3\div6)\cdot10^{-4}$ Па. Указанный уровень разряжения достигается с помощью турбомолекулярных и магниторазрядных насосов и не предохраняет исследуемую мишень от появления углеродного нагара в пятне падения первичного ионного пучка. Толщина нарастающей пленки аморфного углерода определяется суммарной дозой облучения. Для указанного интервала разряжения при суммарной дозе облучения 100 микрокулон на мм^2 (6,25·1014 протонов /мм^2) пучком протонов с энергией E_0 = 1 МэВ, наблюдается появление углеродной пленки толщиной 5÷10 нм. На скорость нарастания пленки мало влияет изменение энергии пучка. В тоже время использование более тяжелых ионов (H^+, He^+) ускоряет нарастание углеродного нагара. Для уменьшения влияния этого эффекта применяется азотное охлаждение коллиматора.

Используемые в комплексе отклоняющие магниты для обеспечения должной моноэнергетичности пучка должны характеризоваться высокой стабильностью и однородностью магнитного поля в зазоре. При ширине зазора около 20м и диаметре полюсов магнита $d \approx 200$мм в зазоре локализуется поле 0,1 ÷ 1Те. Такие поля создаются электромагнитами с принудительным охлаждением, и нуждается в наличии регулятора тока, снабженного прецизионной системой стабилизации.

Аналитические камеры комплекса обычно оснащаются компьютерно-управляемыми гониометрами, характеризующимися несколькими поступательными и двумя вращательными степенями свободы. Наличие таких возможностей позволяет осуществлять смену диагностируемых

мишеней без вскрытия вакуумной камеры и поиск ориентации исследуемых монокристаллических объектов, соответствующих осевому и плоскостному каналированию ионных пучков в них. В качестве регистрирующих устройств обычно используются кремниевые поверхностно-барьерные детекторы, кремний-литиевые охлаждаемые детекторы рентгеновского излучения, а также германиевые или сцинтилляционные детекторы большого объема, чувствительные к жесткому вторичному гамма-излучению. Поверхностно барьерные детекторы применяются для регистрации рассеяния мишенью ионов первичного пучка, ядер отдачи, а также вторичных заряженных частиц, являющихся продуктами ядерных реакций. Эти детекторы, как правило, располагаются внутри вакуумных камер в непосредственной близости от исследуемой мишени. Рентгеновские и гамма – детекторы обычно устанавливаются вне камеры, а регистрация жесткого фотонного излучения осуществляется через тонкое *Be* окно.

При нанесении диффузионного дискретного оксидного слоя происходят физические и химические процессы.

Химический состав диффузионного дискретного оксидного слоя, определяли на электронном микроскопе «JSM-5610 LV» предприятия АО «НПЦ «газотурбостроения «Салют», (см. рисунок 3.3).

Наличие низковакуумного режима работы микроскопа позволяет исследовать непроводящие неорганические и органические 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 химического микроанализа EDX JED-2201, позволяющей производить одновременный автоматический качественный и количественный химический анализ до 99 интересующих участков изображения исследуемого объекта.

Рисунок 3.3 – Электронный микроскоп «JSM-5610 LV»

3.3 Методика определения режущих свойств. Оборудование, инструмент, обрабатываемый материал

Объекты исследований. Требования, предъявляемые к режущему инструменту, достаточно сложны. Образцы из инструментальных материалов должны отвечать следующим требованиям:

– быть небольшими по размеру для нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя;

–иметь форму и размеры: подходящие для проведения металлографических и металлофизических исследований их свойств как после нанесения оксидирования, так и после осуществления процесса резания.

–обеспечивать возможность использования их в качестве режущих элементов как при испытаниях на стойкость, так и в исследованиях физических явлений в процессе резания, причем их геометрические параметры должны соответствовать реальным инструментам из тех же марок инструментальных материалов;

Кроме того, очень важна идентичность свойств образцов для надежного воспроизведения результатов при дублировании.

Этим требованиям отвечают многогранные неперетачиваемые пластины. Действительно, они имеют небольшие размеры, и при нанесении диффузионного дискретного оксидного слоя (в идентичных условиях) можно получить достаточное количество образцов для любых исследований; их можно предварительно заточить с любой геометрией, а наличие нескольких режущих кромок требует меньшего общего количества пластинок.

Исходя из этого, была разработана специальная конструкция неперетачиваемых быстрорежущих пластинок (Р6М5, Р6М5К5) производства ОАО «МПО им. И. Румянцева», имеющих в плане квадратную форму размером 18х18х8мм с углом $\alpha = 18^{o}$, r = 1,5мм, (см. таблицу 3.1). При их изготовлении из стандартных и экспериментальных марок сталей было уделено особое внимание на обеспечение идентичности их свойств. Заготовки каждой марки были из одной болванки. Термообработка проведена по рекомендованным для этих марок сталей режимам, в строго одинаковых условиях.

Таблица 3.1 – Геометрические параметры режущих инструментов

Конструкция пластинок	Рабочие углы инструментов, град						Радиус при вершине r, мм
	γ	α	φ	φ_1	α_1	λ	
Квадрат 18х18х8	8	18	45	15	10	0	1,5

После термообработки была измерена твердость пластинок и произведена отбраковка тех из них, которые отличались от среднего значения твердости более чем на единицу HRC.

По единой технологии выполнена и заточка пластинок: по задним поверхностям на универсально-заточном станке вначале кругом (V = 25м/с; S = 0,005 мм/дв.ход) с ручной продольной подачей, а затем эльборовым (V = 25м/с; S = 0,0025мм/дв.ход) также с ручной продольной подачей. По передней поверхности - на плоскошлифовальном станке с интенсивным

охлаждением последовательно абразивным электрокорундовым кругом (V = 18 м/с; S = 2 м/мин; t = 0,02 мм) и эльборовым кругом (режимы те же) с последующим выхаживанием.

Всего по указанной технологии было изготовлено и испытано более 300 пластинок. Для их закрепления были использованы специальные конструкции державок.

В качестве объекта исследований также были изготовлены концевые фрезы из твердого сплава ВК10ХОМ производства АО «НПЦ газотурбостроения «Салют» R<1°, Z = 6 мм и R<1°, Z = 4 и твердосплавные пластины фирмы «Искар» IC50M, IC3028, IC9015, IC9025.

Оборудование. Все стойкостные испытания при продольном точении и исследования функциональных параметров резания проведены на станке фирмы Jesco Machinery 1650ENC с ЧПУ, (см. рисунок 3.4). Станок имеет систему Fagor 800TGI и укомплектован трехкомпонентным динамометром «9257 BA» со встроенным усилителем заряда, датчиком акустической эмиссии «Kistler 8152B2», акселерометром «Kistler 8614A1000M1» с усилителем сигнала «Kistler 5127B». Все это дает автоматизированный прием информации о динамических и виброакустических процессах при резании в реальном масштабе времени и обработку этой информации с целью определения физических критериев, характеризующих состояние технологической операции.

В систему сбора и обработки данных входит: компьютер Panasonic CF-28PB, 800 МГц Pentium Processor, 256MB RAM, 30GB HDD, 13.3 TFT–Цветной дисплей – промышленное исполнение; встроенный аналогово-цифровой преобразователь, имеющий 8 аналоговых входных каналов SubD 9–pole, возможность автоматической корректировки смещения нуля. Возможная частота выборки от 156,25 до 80000 выборок в секунду. При использовании 8 входных каналов частота выборки до 10000 выборок в секунду на канал. Для приема и первичной обработки данных применяется программа Mlab. Для дальнейшей обработки данных используется программа

MGrahp, позволяющая быстро проводить обработку больших массивов с результатами измерений.

Рисунок 3.4 – Станок фирмы Jesco Machinery 1650ENC с ЧПУ

Усилия резания, полученные на динамометре «9257 BA» фиксировались акселерометром «Kistler 8614A1000M1». В процессе проведения исследований проводились тщательные наблюдения за характером и величиной износа рабочих поверхностей режущего инструмента.

Надежность и долговечность инструмента оценивали по среднему значению стойкости $\overline{T}$, коэффициенту вариации стойкости ν_T, интенсивности изнашивания J:

$$\overline{T} = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_i}{n}; \quad \nu_T = \frac{\sigma}{T}; \quad \sigma = \sqrt{[\sum_{i=1}^{n} (T_i - T)^2]/n}; \quad J = \frac{h_3}{V \cdot T_M},$$

где: n – число дублей испытаний; $T_M = \frac{L}{n \cdot s}$ – машинное время; L – длина пути инструмента, включающая длину заготовки, врезание и перебег; n, s – число оборотов и подача.

Оценку коэффициентов вариации стойкости инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем, со сплошным покрытием и без упрочнения производили по критерию Стьюдента:

$$t = \frac{\nu_T - \nu_{TДСП}}{\left(\frac{\nu_T}{2 \cdot n}\right) - \left(\frac{\nu_{TДСП}}{2 \cdot n_{ДСП}}\right)},$$

где: υ_T; $\upsilon_{ДСП}$ – коэффициент вариации стойкости для контрольного инструмента и инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем; n, $n_{ДСП}$ – число дублей испытаний контрольного режущего инструмента и режущего инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем.

Для оценки резко выделяющихся значений стойкости инструмента использовали критерий Гиббса:

$$Q = \frac{T_{max} - T}{S},$$

при $Q > Q_{КР}$ значение T_{max} отбрасывали как содержащую грубую ошибку.

Стойкостные испытания фрез из твердого сплава и исследования функциональных параметров фрезерования проведены на фрезерном станке Liechti с ЧПУ, (см. рисунок 3.5).

Рисунок 3.5 – Фрезерный станок Liechti с ЧПУ

Обрабатываемые материалы. Основной объем исследований выполнен при обработке конструкционной углеродистой стали 40Х и титанового сплава ВТ6 (для изучения физических явлений в процессе резания заготовки

из стали 45 и стали 40Х вырезаны из одной болванки). Их твердость указана в таблицах и графиках результатов испытаний.

Заготовки для продольного точения – пруток d = 120 – 200мм, длиной L = 600мм. Припуск снимали до соотношения L/d<8. При точении сталей после термообработки использовали трубы с толщиной 15 – 30мм. При проведении стойкостных исследований при фрезеровании производили обработку титановых лопаток для черновой и чистовой операции.

Методика испытаний. Каждый опыт при проведении стойкостных испытаний дублировали от 3-х до 6 раз в зависимости от задач исследований и условий обработки. Окончательное значение стойкости рассчитывали по методу наименьших квадратов. В одном из дублей фиксировали динамику развития износа по передней и задней поверхности.

Размеры площадок износа измерялись на инструментальном микроскопе БМН – 1Ц с ценой деления 0,001мм, (см. рисунок 3.6). Фотографирование площадок износа производилось на «POLYVAR» фирма REICYER (Австрия) с помощью фотоаппарата «Олимпус» модели 100 – ЕС.

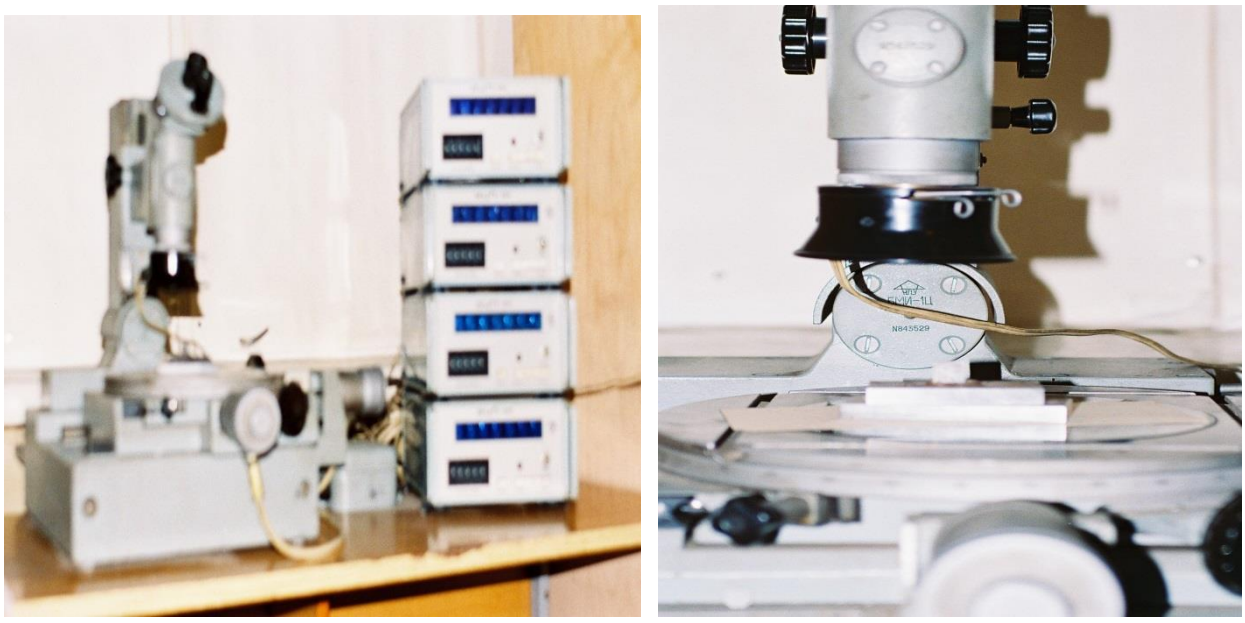


Рисунок 3.6 – Инструментальный микроскоп БМН-1Ц

Критерий износа пластин во всех случаях был выбран по задней поверхности, обычно до h ⊐ = 0,5мм. Достижение такой величины износа при

работе быстрорежущими и твердосплавными пластинами означает практически полное использование их режущих свойств.

При исследовании фрез был выбран критерий затупления по уголку $h_з$ = 0,3 – 0,4мм, при котором появлялся характерный шум.

3.4 Методика исследования физико-механических свойств диффузионного дискретного оксидного слоя. Оборудование и обрабатываемый материал.

Были проведены исследования на механические свойства инструментального материала с диффузионным дискретным оксидным слоем. Исследование были проведены на АО «НПЦ газотурбостроения «Салют» по ГОСТу 25.604-82. В качестве образцов использовали прямоугольные бруски размером $5_{-0,05} \times 2_{-0,05} \times 70$мм, было взято по пять образцов на каждую серию испытаний, (см. рисунок 3.7). Образцы должны иметь гладкую ровную поверхность не грубее *Ra* = 20 мкм по ГОСТ 2789—73, без вздутий, сколов, трещин, расслоений и других дефектов, заметных невооруженным глазом. Отклонение образцов от номинальных размеров по ширине и толщине образца не должно превышать 0,05 мм. В качестве материала для образцов были использованы: быстрорежущая сталь (Р6М5, Р6М5К5), твердосплавный материал (ВК10ХОМ), а также «образец детали» из титанового сплава ВТ3–1 с диффузионным дискретным оксидным слоем и сравнивались с контрольной партией образцов.

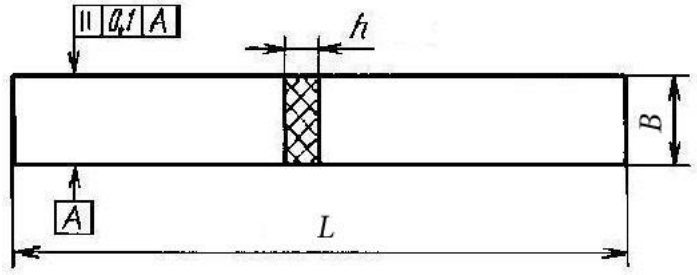


Рисунок 3.7 – Образец для испытаний на растяжение

Для определения предела прочности при растяжении на образец устанавливали максимальную нагрузку F_{max}, которую выдержал бы образец.

Предел прочности при растяжении σ_B определи по формуле:

$$\sigma_B = \frac{Fmax}{a \cdot h} \text{ МПа},$$

где: F_{max} – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца, Н; b – ширина образца, мм; h – толщина образца, мм.

Испытания на усталость проводили в соответствии со стандартом по ОСТ100870-77, устанавливающий как метод испытания, так и порядок подготовки проведения испытаний и способы обработки полученных результатов испытаний проводили в соответствии с методикой АО «НПЦ газотурбостроения «Салют». Исследовались образцы из титанового сплава ВТ3–1 с диффузионным дискретным оксидным слоем и сравнивались с контрольной партией. Для достоверности полученных результатов испытаний использовали партии образцов, состоящих из 20 шт. За предел выносливости принимается то небольшое значение максимальных напряжений цикла, действующих на поверхности образца, при которых не происходит разрушения до заданного числа циклов. Стандартный метод применяется для построения осредненной кривой усталости. Значение предела выносливости, полученное по этому методу, используется для вычисления запаса прочности. Для достоверности полученных результатов испытаний использовали партии образцов, состоящих из 20 шт. Испытания проводили не менее чем при трех амплитудах напряжений цикла σ_a, причем, согласно рекомендации стандарта, испытания начинали с небольших амплитуд напряжений, например при $\sigma_a \approx 0{,}5\sigma_a$ - для образцов из деформируемых материалов. За базу испытаний для образцов из титановых сплавов принимали количество циклов - $N = 2 \cdot 10^8$ циклов. При сравнительных испытаниях за предел выносливости принимали те амплитуды напряжений, при которых без разрушений выдерживалась заданная база испытаний не менее трех образцов. Порядок проведения испытаний принимали следующий. Первый образец исследовали на заданной базе испытаний при амплитуде напряжений цикла превышающий предполагаемый

предел выносливости в 1,1 – 1,3 раза. Каждый последующий образец исследовали в зависимости от результатов испытаний предыдущего образца при амплитуде напряжений, уменьшенной (если предыдущий образец не прошел испытания без разрушения) или увеличенной (если предыдущий образец прошел базу испытаний) на 0,03-0,07 от величины первоначальной амплитуды напряжений. При получении результатов испытаний образца, противоположного по результату испытаний предыдущего (предыдущий прошел базу, а последующий не прошел или наоборот), испытывается не менее шести образцов при максимальной амплитуде напряжений образца, прошедшего базу испытаний. При поломке любого из образцов снижают амплитуду напряжений. За предел выносливости принимают максимальную амплитуду напряжения, при которой базу испытаний без разрушения прошли не менее 6 образцов, при отсутствии образцов, не прошедших базу испытаний при этой амплитуде вероятностью 0,9 и числе образцов более 10. Для испытания на усталость использовали установку, позволяющую возбуждать колебания по основному тону и по высшим формам колебаний с необходимой амплитудой напряжения, (см. рисунок 3.8).

Рисунок 3.8 – Установка для усталостных испытаний LFV – 50

Установка оборудована:

–устройством для поддержания амплитуды колебаний с заданной точностью;

– системой для измерения и контроля амплитуды деформаций (напряжений);

– устройством для измерения перемещений колеблющихся сечений

– звуковым генератором:

– частотомером;

– нагревательным устройством с автоматическим регулированием температуры (при испытаниях при высоких температурах).

Относительна среднеквадратическая погрешность (коэффициент вариации) измерительного устройства для определения амплитуды деформаций (перемещений) составлял не более ± 2 %.

Для определения физических свойств диффузионного дискретного оксидного слоя были проведены исследования по микротвердости, а также шероховатости и модуля упругости Юнга.

Измерительная аппаратура. Контроль инструмента с дискретным оксидным слоем осуществлялся с помощью визуального осмотра внешнего вида, а также с помощью сканирующего наноиндентора Hysitron TI 750 Ubi (США)**,** (см. рисунок 3.9).

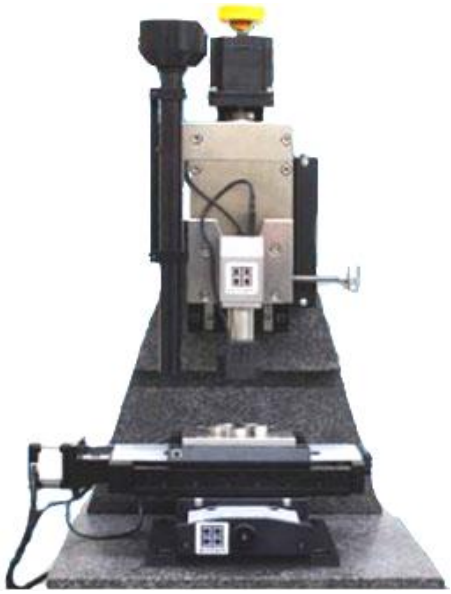


Рисунок 3.9 – Сканирующий наноиндентор Hysitron TI 750 Ubi

Прибор позволяет наносить ультрамикротвердые отпечатки способные оценить микротвердость очень тонких покрытий (до 0,05мкм). Данные по твердости оценивались по шкале HV. С помощью микрокомпьютера

«Сенсор» определялось среднее значение параметров отпечатков по нескольким замерам. Диапазон измерений максимальной силы нагружения 10 мкН-12 000мкН. Было поведено 15 измерений.

Толщина нанесенного дискретного оксидного слоя определялась на от тарированной шкале. Используемый в приборе счетчик Гейгера преобразует отраженные бета - лучи в электрические импульсы, которые передаются на ЭВМ. Полученная информация опознается на ЭВМ и преобразует эти данные, в соответствии с командами оператора, расшифровывает и выдает информацию.

За базовый параметр диффузионного дискретного оксидного слоя использовали контроль по микротвердости и микроструктуре, а также распределение элементов по глубине слоя.

Сканирующий наноиндентор Hysitron TI750 UBI является прецизионным прибором исследовательского класса, предназначенным для выполнения полного спектра наномеханических испытаний с высочайшей чувствительностью и передовыми рабочими характеристиками. Прибор позволяет сканирование поверхности при проведении квазистатических испытаний с высокой скоростью проведения измерений и стабильно высоким качеством. Он имеет емкостный датчик-преобразователь. Датчик объединяет в себе электростатический привод и измерение перемещений за счет емкостного датчика в одном устройстве.

Контроллер позволяет обеспечивать уровень нагрузки на образец <1нН, глубину индентирования 5мкм, разрешение по глубине составляет 0,02нм, при этом точность позиционирования 50нм, а также сверхбыструю обратную связь с частотой 78 кГц. Прибор позволяет осуществлять комплексные процедуры измерений, такие как: твердость, модуль упругости, шероховатость, толщину нанесенного покрытия, а также предоставляет возможность для пользователя устанавливать частоту по своему усмотрению в диапазоне до 30 кГц.

Автоматизированные измерения на TI 750 Ubi могут выполняться при двух масштабах. Пьезосканер, который использовали для визуализации в режиме СЗМ, может использоваться в качестве трехкоординатного позиционирования для прецизионной установки зонда. Это, в свою очередь, позволяет производить измерения на очень точно выбранных участках образца.

С помощью интерфейса ClickMode можно задавать массивы точек для набора статистики, а также для сравнения механических свойств в различных частях образца. Использование опции сервопривода предметного столика открывает возможность проведение измерений на больших площадках или объединения нескольких площадок в последовательности. А интуитивно понятный интерфейс позволяет задавать массивы сканирования практически любой формы за считанные минуты.

Функция автоматизации позволяет производить последовательно тысячи измерений без вмешательства пользователя. Это обстоятельство так же позволяет повысить точность измерений за счет исключения из процесса набора статистического распределения пользователя.

Наноиндентор используется для:

- определение микротвердости
- определение модуля Юнга
- определение шероховатости
- определение адгезионной прочности покрытий
- оценка стойкости к истиранию
- получение картины рельефа поверхности (аналогично АСМ)

Выбор скорости подачи производится процессором по выбранному диапазону измерения усилия и заданной контрольной нагрузки. Касание острия алмаза поверхности образца регистрируется по началу возрастания усилия в устройстве измерения усилия.

Процессор приостанавливает скорость подачи, подводя фактическую величину контрольного усилия с заранее выбранной скоростью к предварительно определенной величине усилия, и затем удерживает это контрольное усилие

на период всего процесса производства отпечатка. Острие алмаза подается к поверхности образца с различной скоростью. Скорость подачи определяется пультом управления, который находится на внешней панели прибора, на основе заданного контрольного усилия и выбранного диапазона измерения. По истечению этого выбранного времени удержания алмаз возвращается в нерабочее состояние. Полученный отпечаток, (см. рисунок 3.10) остается на образце, а твердость фиксируется на пульте управления.

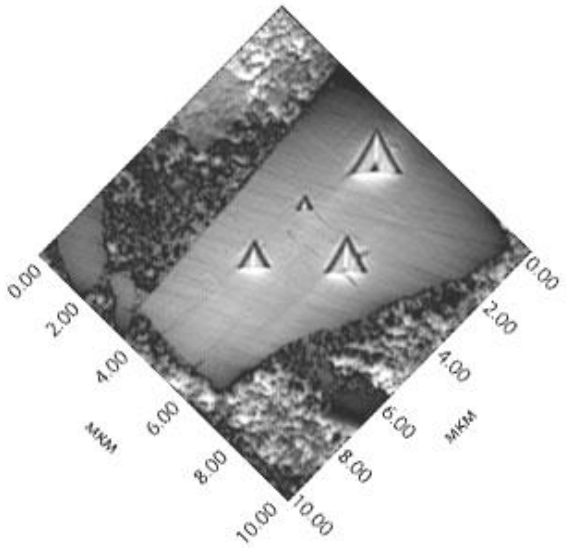


Рисунок 3.10 – Расположение отпечатков на исследуемом образце

Данный прибор позволяет получить субмикронную точность на поверхности образца. Компактные размеры отпечатков и отличные динамические показатели датчика-преобразователя позволяют добиваться непревзойденной термостабильности и быстроту установления их в заданное положение, что крайне необходимо для высокопроизводительных измерений.

Выводы по главе:

1. Разработана методика исследования структуры и состава диффузионного дискретного оксидного слоя.

2.Разработана методика определения режущих свойств. Оборудование, инструмент, обрабатываемый материал.

3. Разработана методика исследования физико-механических свойств диффузионного дискретного оксидного слоя. Оборудование и обрабатываемый материал.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ДИФФУЗИОННОГО ДИСКРЕТНОГО ОКСИДНОГО СЛОЯ

Разработка технологии формирования диффузионного дискретного оксидного слоя базируется на совместном обеспечении условий диффузионного проникновения атомов и ионов активированного воздуха на подложку и наличия оксидов на некоторую упорядоченную совокупность разделенных между собой локальных участках поверхности основы. Следуя перспективным тенденциям упрощения технологии обработки поверхности, соблюдение первого условия реализовывалось использованием в качестве материала оксидного слоя компоненты направленного воздушного потока, активированного пропусканием через область униполярного коронного разряда при атмосферном давлении и положительной полярности коронирующего электрода [60]. Реализация второго условия осуществлялась осевым размещением коронирующего электрода внутри сопла, выходное отверстие которого выполняло функцию ограничения поперечного сечения активированного воздушного потока до размеров площади единичной локальной области покрытия, а механические перемещения сопла формировали упорядоченную совокупность локальных площадей покрытия.

Выборка базовых составляющих процесса нанесения локального диффузионного покрытия является основополагающим предварительным этапом по отношению к разработке технологии его нанесения на конкретном оборудовании, согласованном с произведенной выборкой. Последующая разработка технологии состоит в определении оптимальных режимов нанесения покрытия, обеспечивающих максимально возможное, для используемого в этих целях оборудования, повышение работоспособности инструмента, обусловленное наличием покрытия. Для режущего инструмента критерием эффективности дискретного оксидного слоя является повышение его износостойкости, в сравнении со случаем отсутствия покрытия.

Установочные параметры, определяющие режим нанесения и свойства дискретного оксидного слоя:

- ток, проходящий через коронирующий электрод и зависящий от напряжения на разрядном промежутке;

- давление сжатого воздуха на ходе в сопло;

- расстояние от выходного отверстия сопла до обрабатываемой поверхности;

- угол наклона к ней оси сопла; время, затрачиваемое на обработку единичной локальной области покрытия.

4.1 Оборудование и особенности технологии диффузионного дискретного оксидного слоя

Для упрочнения поверхности инструментального и конструкционного материалов было разработано оборудование, которое состоит из устройства ионизированного воздушного потока «УИВ-1» (патент № 2279962) и электромеханического блока, экологически безопасная для окружающей среды и здоровья человека. Устройство «УИВ-1» [73] обеспечивало формирование на поверхности образца локальной области диффузионного дискретного оксидного слоя, а электромеханический блок позволял реализовать упорядоченную совокупность локальных областей, разделенных промежутками с его практическим отсутствием, именуемую в работе диффузионным дискретным оксидным слоем. Внешний вид разработанного оборудования представлен на рисунке 4.1.

Инструмент или деталь закрепляют в (2) поворотную ось с блоком управления шагового двигателя, (см. рисунок 4.1). Затем выставляют заданную частоту его вращения и заданную подачу линейного перемещения, согласно компьютерной программе «Math».

Обрабатываемый инструмент может совершать как вращательное, так и возвратно-поступательное движение.

Оборудование обеспечено изоляционными материалами от высоковольтного тока и представляет собой единую конструкцию.

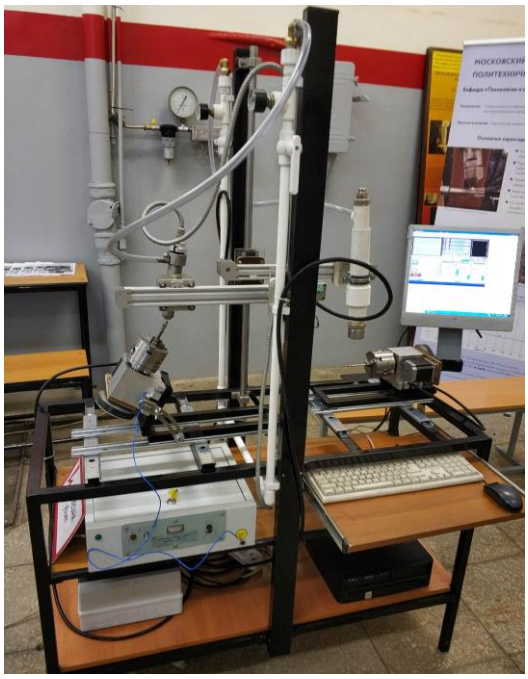
Корпус создан из трубчатого профиля. Спереди оборудования имеется блок драйверов с блоком питания, который имеет как полуавтоматическое управление, так и запрограммированное исполнение. Материал, составляющий сборочной единицы устройства – сталь марки 12Х18Н10Т ГОСТ 12820-80.

Данное оборудование предназначено для промышленного применения.

Основные характеристики соответствуют техническим требованиям ГОСТ. По экологической безопасности и пожарной безопасности соответствует требованиям ГОСТ 12.2.007.0-75 и ГОСТ 12.1.004-91.

Основные технические характеристики оборудования:

Масса устройства	70,0 кг
Габаритные размеры	1760х1180 мм
Рабочий стол	40х100см
Мощность	250Вт
Номинальное напряжение питающей сети	220В.



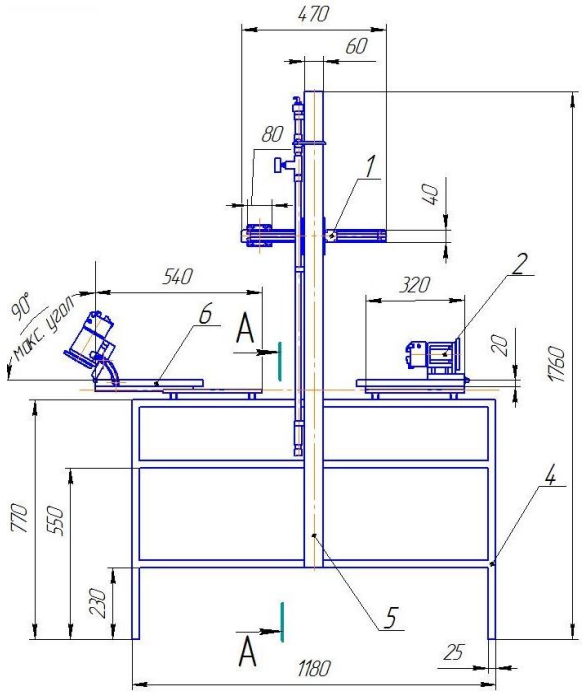


Рисунок 4.1 – Схема и фотография оборудования для формирования дискретного оксидного слоя, оснащенного механизмом крепления деталей:1 – корпус; 2 – воздуховод; 3 – крепежная стойка; 4 – направляющая; 5 – блок управления шагового двигателя; 6 – модуль линейного перемещения; 7 – система управления.

Проверку требований по электрической совместимости оборудования проверяли по методике, указанной в ГОСТ 23511-79. Прочность электрической изоляции проверяли в соответствии с требованиями и методами, указанными в ГОСТ 27570.0-87.

Устройство «УИВ-1» – это сопло – ионизатор, совмещающее в себе организацию направленного воздушного потока и его активацию положительными ионами, подключенное к источнику постоянного напряжения (в диапазоне 0 – 16 кВ). Корпус сопла состоит из центрального воздуховода и двух съемных насадок на входе и выходе, (см. рисунок 4. 2). Входная насадка снабжена штуцером для подвода сжатого воздуха из стационарной магистрали с наличием влагомаслоотделителя и фильтра для задержки фракций из крупных частиц. Давление воздуха на входе в сопло регулируется винтом редуктора воздушной магистрали и измеряется расположенным за ним манометром. Формирование активированного воздушного потока на выходе из сопла осуществляется выходной насадкой.

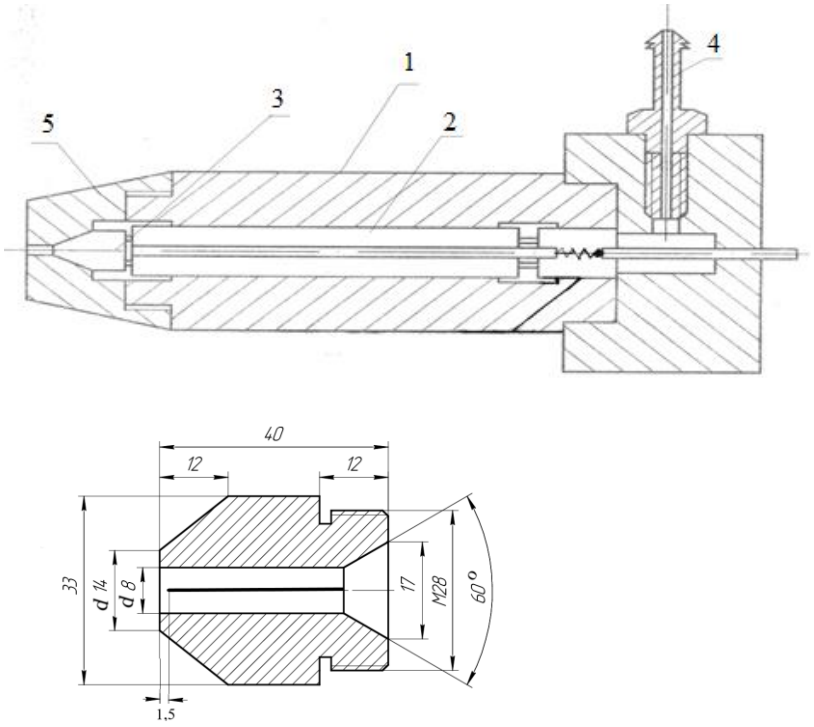


Рисунок 4.2 – Конструкция сопла-ионизатора

1 – корпус; 2 – центральный воздуховод; 3 – вольфрамовый электрод; 4 – штуцер; 5 –насадка, регулирующая выходящий поток.

Металлический корпус сопла и расположенный на его центральной оси стержень из жесткой проволоки диаметром 3,0мм образуют систему из двух электродов. Стержневой электрод играет роль анода (нейтрализует приходящие на него отрицательно заряженные частицы – электроны и отрицательные ионы) и электрически изолирован от корпуса сопла диэлектрическими элементами его центровки и крепежа. Подключение электродов к источнику напряжения происходит высоковольтным кабелем через входную насадку с подачей положительного потенциала на анод и заземлением корпуса сопла через землю источника. Сильная неоднородность электрического поля вблизи «острия» анода, расположенного в области выходной насадки, обеспечивает условия образования униполярной положительной короны.

Винтовой крепеж выходной насадки позволяет осуществлять регулировку расстояния от острия анода до среза ее выходного отверстия. Небольшое заглубление острия в выходное отверстие приводит к возникновению разрядной короны внутри сопла непосредственно перед выходом. Этим, с одной стороны, достигается максимальный охват короной разряда поперечного сечения подводимого к ней воздушного потока в условиях его ограничения сечением выходного канала насадки, а, с другой стороны, близостью от выхода из сопла минимизируется оседание увлекаемых потоком положительных ионов на внутреннюю поверхность насадки. Также заглубление уменьшает влияние особенностей краевого поля электродов сопла, на расхождение выходящего из него активированного воздушного потока.

В состав электромеханического блока входят: установочный стол, механическая система крепежа, возвратно-поступательное перемещение сопла, за счет линейного модуля и вращательное перемещение образца, за счет шагового двигателя. Система блока управления перемещения линейного модуля осуществляет по шаговое перемещение сопла согласно выставленному режиму. Для осуществления вращательных перемещений

образец закрепляется в установленный на столе шпиндель (ось вращения которого параллельна координатной оси x). Управлять процессом можно и компьютеризировано. Компьютерная программа «Math» обеспечивает пошаговое перемещение сопла и вращательное перемещение образца по заданным выставленным координатам. Обеспечение дискретного диффузионного упрочнения предполагает, что линейный размер шага должен превышать размер диаметра выходного отверстия сопла. При диаметре выходного отверстия 8мм, размер шага 2,5 – 3 мм.

Согласно требованиям электробезопасности конструкция разработанной установки и ее электрическая схема предусматривают наличие надежного заземления у всех ее металлических элементов, доступных для соприкосновения с оператором. Корпус сопла, эквипотенциальный с обрабатываемым образцом, привносит существенные изменения в ранее рассмотренную идеализированную систему электродов типа «игла-плоскость», использованную в качестве естественной основы для исходных оценочных суждений. Заглубление острия коронирующего электрода в сопло приводит к тому, что значительная часть пролетного промежутка за соплом становится почти эквипотенциальной в осевом направлении и скорость приходящих на образец положительных ионов, будет определяться манометрическим давлением на входе в сопло.

Особое внимание при проведении экспериментов уделяли озону, образуемому коронным разрядом и выделяемому в процессе формирования диффузионного дискретного оксидного слоя, (см. главу 3), поскольку насыщение им воздуха в рабочей зоне с превышением ПДК вредно для здоровья человека. Для определения концентрации озона был использован прибор «Газоанализатор 3.02 – П – Р», (см. рисунок 4.3). Показания озона в рабочей зоне формирования оксидного слоя сравнивали с показанием «санитарной нормы» ПДК, что в свою очередь, давало возможность корректировать технологический процесс нанесения локального диффузионного дискретного оксидного слоя, согласно экологическим

нормам. Контроль концентрации озона производили на выходе из сопла, введением газозаборного зонда из нержавеющей стали с термопарой хромель – алюмель в зону напыления, а показания выводились на панель прибора «Газоанализатор 3.02- П-Р».

Рисунок 4.3 – Прибор для замера концентрации озона «Газоанализатор 3.02- П-Р»

Концентрацию озона, измеряли при значительном варьировании тока коронного разряда $I_К$ и давления сжатого воздуха $p_В$. Результаты измерений концентрации озона для диапазона измерения тока коронного разряда и давления сжатого воздуха $p_В$ представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Концентрация озона в рабочей зоне формирования дискретного оксидного слоя

$p_В$, МПа	$I_К$,мкА	К, мг/м^3
0,1	100	0,073
0,1	200	0,077
0,1	440	0,086
0,2	100	0,051
0,2	200	0,064
0,2	440	0,082
0,5	100	0,037
0,5	200	0,031
0,5	440	0,026

При этом концентрация озона составляла от 0,026 мг/м^3 до 0,086 мг/м^3, что вполне допустима с точки зрения норматива ПДК, которая составляет 0,1 мг/м^3.

Большое внимание уделяли также предварительной подготовке режущего инструмента. В частности, подготовка образцов включала:

– предварительную промывку в щелочном растворе;

– обезжиривание спиртом и ацетоном.

В некоторых случаях, преимущественно при подготовке концевых фрез d=6,0-12,0мм, вместо промывки в щелочном растворе использовали ультразвуковую мойку с f = 10-20 кГц, в среде 30% водного раствора моющего средства «Новость».

4.2 Исследование технологических факторов нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя на режущий инструмент

В качестве объекта исследований использовали квадратные пластины из быстрорежущей стали Р6М5, Р6М5К5, прямоугольные твердосплавные пластины фирмы «Искар» IC3028, IC9015, IC9025, IC50M, а также концевые твердосплавные фрезы ВК10ХОМ, см. главу 3. Режущие пластины использовали, как для отработки технологического процесса, металлографических исследований, так и для определения модуля упругости, шероховатости, твердости и предела прочности. Особое внимание в исследованиях уделяли исходной аттестации пластин. Пластины подбирали таким образом, чтобы разброс их микротвердости составлял не более (5 – 7)% от стандартного значения микротвердости пластин, прошедших полную термообработку и заточку (H_{μ}^{50} = 860 – 870).

Исследование технологии нанесения локального диффузионного дискретного оксидного слоя осуществляли на твердосплавных и быстрорежущих пластинах, которые закрепляли в оснастку, крепящуюся в шпинделе устройства, (см. рисунок 4.1) на расстоянии 10 – 12мм от сопла и под углом 70° – 80° к соплу, при этом ток коронного разряда и давление сжатого воздуха были постоянными ($p_В$ = 0,1МПа; $I_К$ = 200мкА). Рассмотрение углов $\alpha_н$ наклона сопла и его расстояния L_c от обрабатываемой поверхности проводили с учетом формирования пограничной диффузии элементов активированного воздуха для формирования тонкого диффузионного дискретного оксидного слоя. Результаты влияния углов и расстояния показаны на рисунках 4.4 – 4.5.

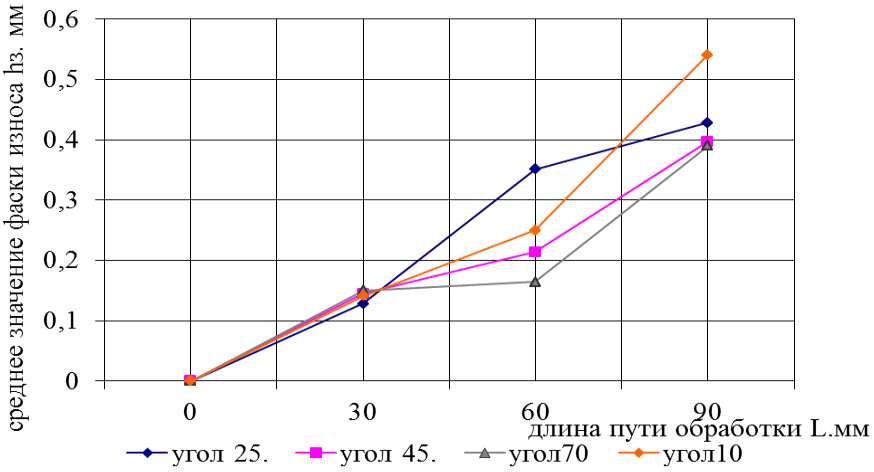


Рисунок 4.4 – Влияние угла наклона сопла к образцу на износ по задней грани твердосплавной пластины фирмы «Искар» IC50M при точении стали 40Х (220 НВ): с v = 190 м/мин; s = 0,4мм/об.; t = 2мм

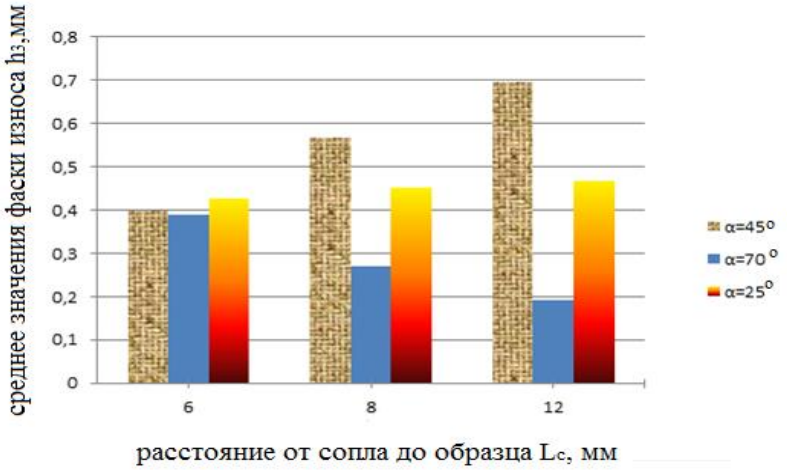


Рисунок 4.5 – Влияние расстояния от сопла до образца на износ по задней грани твердосплавной пластины фирмы «Искар» IC50M при точении стали 40Х (220 НВ): с v = 190 м/мин; s = 0,4мм/об.; t = 2мм

Как видно из представленных графиков, минимальный износ твердосплавного инструмента происходит при расположении сопла на расстояние 12мм и под углом 70 – 80° к обрабатываемой поверхности. Таким образом, при дальнейшем проведении экспериментов расположение режущего инструмента осуществляли только на расстоянии 10 – 12мм и под углом 70° – 80° к обрабатываемой поверхности.

4.3 Математическое моделирование процесса нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя на режущий инструмент

Исследования по оптимизации параметров нанесения 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 дискретного оксидного слоя на износостойкость твердосплавных пластин применительно к точению стали. На втором этапе была использована математическая модель процесса нанесения локального диффузионного дискретного оксидного слоя с учетом стохастического характера.

В качестве варьируемых параметров процесса нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя были выбраны давление сжатого воздуха $p_В$ и ток коронного разряда $I_К$.

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 факторов, находящиеся внутри диапазона, были практически реализуемы. Исходя из сказанного, были использованы следующие диапазоны варьирования параметров: $I_К$ = 140 – 440 мкА; $p_В$ = 0,1 – 0,5 МПа для твердосплавных пластин IC50M. Уровни варьирования параметров процесса нанесения локального диффузионного дискретного оксидного слоя представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Диапазон варьирования параметров при построении математической модели

№ опыта	Параметр $I_К$, мкА.	Параметр $p_В$, МПа
1	140	0,1
2	140	0,3

продолжение таблицы 4.2

3	140	0,5
4	240	0,1
5	240	0,3
6	240	0,5
7	440	0,1
8	440	0,3
9	440	0,5

При разработке математической модели процесса нанесения локального диффузионного дискретного оксидного слоя использовали мультипликативную экспоненциально-степенную функцию для анализа комплекса параметров, влияющих на работоспособность диффузионного дискретного оксидного слоя. Использовали функцию, выражающую взаимосвязь износостойкости режущего инструмента и параметров, наиболее сильно влияющих на нее:

$$h_3 = C \cdot I^{a_1} \cdot p_B^{a_2} \cdot \exp(b_1 \cdot I + b_2 \cdot p_B) \qquad (4.1)$$

$$I_K = -\frac{-a_1}{b_1}; \qquad p_B = -\frac{-a_2}{b_2},$$

где: h_3 – величина изнашивания задней поверхности режущей пластины; I_K – ток коронного разряда; p_B – давления сжатого воздуха α – показатель распределения; C_i – постоянная; x, y – степенные показатели влияния параметров $p_в$ и $I_к$ на износостойкость режущего инструмента.

Расчетные значения параметров модели осуществляли по математической программе «MOD_UNI» и представлены в таблицах 4.3 – 4.4.

Таблица 4.3 – Расчетные значения параметров модели (4.1)

Опыт	№	Параметр Z	Фактор R
1	1 2	140 0,1	0,49
2	1 2	140 0,3	0,5
3	1 2	140 0,5	0,53
4	1 2	240 0,1	0,51
5	1 2	240 0,3	0,64

продолжение таблицы 4.3

6	1 2	240 0,5	 0,65
7	1 2	440 0,1	 0,74
8	1 2	440 0,3	 0,58
9	1 2	440 0,5	 0,6

Таблица 4.4 – Распределение отклонений

No	h	P(h)
1	0.8660618	0.1111111
2	0.9204168	0.2222222
3	0.9222507	0.3333333
4	0.9801031	0.4444444
5	0.9988939	0.5555556
6	1.021498	0.6666667
7	1.063599	0.7777778
8	1.085506	0.8888889
9	1.178091	1

****** ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ ******

Коэффициент C(1) 3.258543E-02
A(1,1) 0.5570936 A(1,2) - 5.900139E-02
B(1,1) -1.365648E-03 B(1,2) 0.3301574
Показатель α 10.60875

Математическая реализация модели (4.1) и результаты экспериментального исследования по выявлению влияния p_B и $I_к$ на износостойкость режущего инструмента, а также на эффективность и долговечность нанесения локального диффузионного дискретного оксидного слоя на твердосплавные режущие пластины IC50M* представлена в виде зависимостей:

*Экспериментальная оценка значений h_3 при различных сочетаниях p_B и $I_к$ производили при точении стали 40Х (220 НВ) с v = 190 м/мин; t = 2мм; s = 0,4мм/об. и τ = 5 мин.

$$h_З = 3{,}25 \cdot 10^{-2} \cdot I_К^{0{,}557} \cdot p_В^{-0{,}059} \cdot \exp(-1{,}365648 \cdot 10^{-3} I_К + 0{,}3301574 p_В)$$

Производная износа по задней поверхности твердосплавных пластин по фактору $I_К$ при локальном диффузионном дискретном оксидном слое будет иметь следующий вид:

$$\frac{dh_З}{dI_К} = 0$$

После преобразования и дифференцирования получим:

$$\frac{dh_З}{dI_К} = C \cdot p_В^{a_2} \cdot \exp(b_2 \cdot p_В) \cdot \left[a_1 \cdot I_К^{a_1 - 1} \cdot \exp(b_1 \cdot I_К) + b_1 \cdot I_К^{a_1} \cdot \exp(b_1 \cdot I_К)\right]$$

или

$$\frac{dh_З}{dI_{Ti}} = a_1 I_К^{-1} + b_1 = 0$$

Оптимальное значения тока коронного разряда при нанесении диффузионного дискретного оксидного слоя будет следующее:

$$I_к = -\frac{0{,}5570936}{-1{,}365648 \cdot 10^{-3}} = 407\text{мкА} \quad \text{или} \quad I_К = 400\text{мкА} \qquad (4.3)$$

Производная износа по задней поверхности твердосплавных пластин по фактору $p_В$ при локальном диффузионном дискретном оксидном слое будет иметь следующий вид:

$$\frac{dh_З}{dp_В} = 0$$

После преобразования и дифференцирования получим:

$$\frac{dh_З}{dp_В} = C \cdot I_К^{a_1} \cdot \exp(b_1 \cdot I_К) \cdot \left[a_2 \cdot p_В^{a_{21} - 1} \cdot \exp(b_2 \cdot p_В) + b_2 \cdot p_В^{a_{12}} \cdot \exp(b_2 \cdot p_В)\right]$$

или

$$\frac{dh_З}{dp_В} = a_2 p_В^{-1} + b_2 = 0$$

Оптимальное значения давления сжатого воздуха при нанесении локального диффузионного дискретного оксидного слоя будет следующее:

$$p_в = -\frac{0{,}059001}{-0{,}3301574} = 0{,}178 \text{ МПа} \quad \text{или } p_В = 0{,}2 \text{ МПа} \qquad (4.4)$$

Оптимальные значения параметров были использованы для нанесения локального диффузионного дискретного оксидного слоя на твердосплавные пластины IC50M.

Анализ данных зависимостей (4.3) – (4.4) позволяют отметить влияние давления сжатого воздуха $p_В$ и тока коронного разряда $I_К$ при постоянном времени нанесения локального диффузионного дискретного оксидного слоя, в пределах 180 мин.

Аналогичные эксперименты были произведены для других режущих пластин, твердосплавных концевых фрез.

Результаты стойкостных испытаний твердосплавных пластин IC50M с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем с оптимальными параметрами процесса нанесения локального диффузионного дискретного оксидного слоя ($p_в$ = 0,2 МПа; $I_к$ = 400 мкА), установленными по предлагаемой математической модели представлены в таблице 4.5. В качестве исследований была, взята чистовая операция точения, стали 40Х (220 НВ) резцом с твердосплавной пластиной IC50M: v = 190 м/мин; s = 0,4 мм/об; t = 2мм. Были исследованы 4-х гранные твердосплавные пластины, каждые из которых была закодированы собственным номером. В частности, пластины с диффузионным дискретным оксидным слоем, полученные при оптимальном сочетании технологических параметров, имели интенсивность изнашивания в три - четыре раза выше, чем контрольные пластины.

Таблица 4.5 – Результаты испытаний твердосплавных пластин IC50M с диффузионным дискретным оксидным слоем по оптимальному режиму формирования дискретного оксидного слоя

№ пластины	№ грань	$h_з$, мм	τ, мин	J - интенсивность изнашивания, мм/мин.
2	1	0,28	14,1	0,019
	2	0,28	10,51	0,026
	3	0,27	16,05	0,015
4	1	0,28	11,5	0,024
	2	0,27	15,1	0,018
	3	0,28	19,0	0,015

продолжение таблицы 4.5

6	1 2 3	0,27 0,27 0,28	11,0 12,7 17,8	0,024 0,021 0,015
7	1 2 3	0,18 0,20 0,28	14,3 12,3 15,05	0,017 0,021 0,016
9	1 2 3	0,23 0,30 0,27	10,8 18,8 17,0	0,017 0,023 0,015
11	1 2 3	0,28 0,31 0,26	17,9 18,3 16,5	0,019 0,027 0,014
Исходные образцы				
1	1 2 3	0,31 0,6 0,4	3,2 2,8 1,3	0,097 0,214 0,308
3	1 2 3	0,29 0,35 0,4	2,5 1,8 1,7	0,115 0,194 0,235
5	1 2 3	0,33 0,4 0,29	2,3 2,7 1,1	0,143 0,148 0,263
8	1 2 3	0,32 0,4 0,29	2,8 3,2 2,1	0,154 0,147 0,260
10	1 2 3	0,31 0,4 0,37	3,3 3,7 3,6	0,145 0,151 0,178
12	1 2 3	0,29 0,41 0,36	3,2 2,8 3,0	0,143 0,138 0,163

В частности, пластины с диффузионным дискретным оксидным слоем, полученные при оптимальном сочетании технологических параметров, имели интенсивность изнашивания от I до 8 раз ниже, чем интенсивность изнашивания контрольных пластин IC50M без обработки.

Анализ математической модели процесса нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя твердосплавных пластин, а также данные, представленные в таблицах 4.3 и 4.5 позволяют отметить влияние оптимальных параметров тока коронного разряда и давления сжатого воздуха на процесс обработки (фаска изнашивания, интенсивность изнашивания).

Выводы по главе:

1. Разработана схема формирования диффузионного дискретного оксидного слоя.

2. Разработана установка диффузионного дискретного оксидного слоя на режущий инструмент и детали.

3. Разработана технология диффузионного дискретного оксидного слоя. Данная технология позволяет сформировать на поверхности металла тонкий оксидный слой, имеющий нестехиометрическую структуру, что способствует увеличению прочности поверхностной пленки покрытия на инструментальном и конструкционном материале, не изменяя структуру основы.

4. Получены оптимальные параметры процесса формирования диффузионного дискретного оксидного слоя на инструментальном и конструкционном материале ($p_в$ =0,2 МПа; $I_к$ = 400мкА), увеличивающие долговечность и износостойкость.

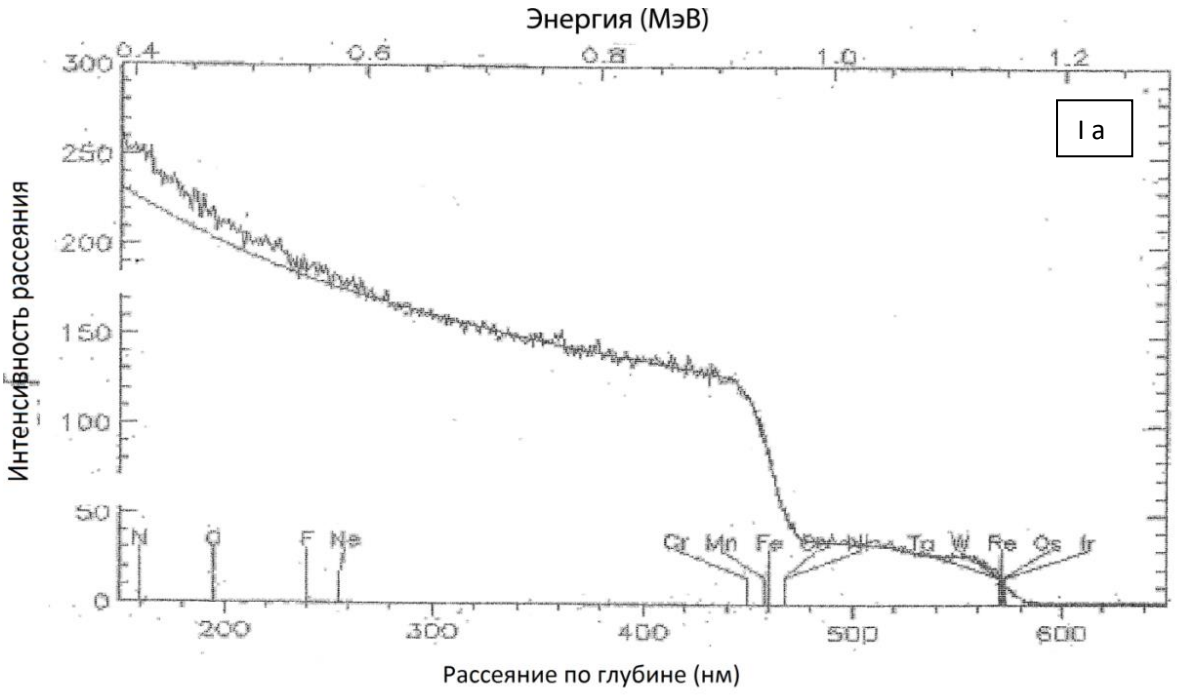
ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СОСТАВА И СТРОЕНИЯ ДИФФУЗИОННОГО ДИСКРЕТНОГО ОКСИДНОГО СЛОЯ

5.1 Распределение концентрации элементов в диффузионном дискретном оксидном слое, сформированном на различных материалах

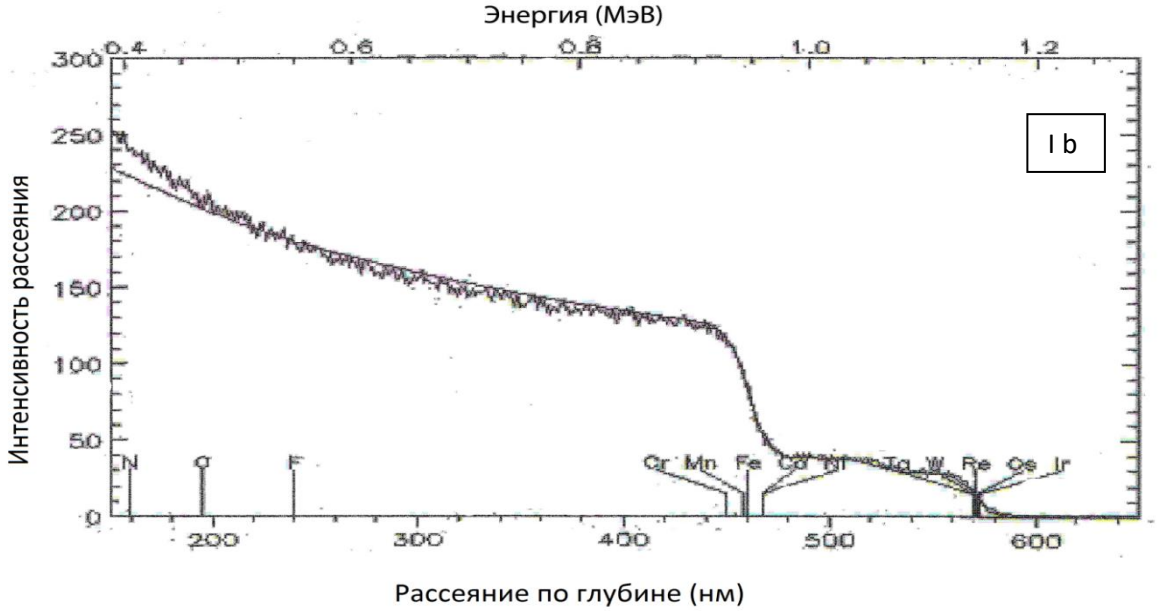
Была проведена оценка толщины дискретного диффузионного слоя (см. гл. 3.2 стр. 145). Характер распределения концентрации элементов диффузионного дискретного оксидного слоя, таких как кислород, азот и других элементов по глубине проникновения показан на рисунках 5.1 – 5.3.

Спектр рассеяния представленный на рисунках 5.1 – 5.3 отражает, различную глубину проникновения ионов гелия и водорода в материалы (ионы He^+ на глубину до1мкм, а ионы H^+ на глубину до10мкм), что дает возможность судить о динамике процесса насыщения кислородом поверхностных слоев субстрата, образуя оксидное покрытие типа $Me_xO_y–O_2$. Послойный спектральный анализ дает типичную картину проникновения ионов кислорода по глубине, а также дает основание утверждать, что процесс переноса положительных ионов кислорода происходит диффузионным путем. При формировании оксидного слоя происходят физические и химические процессы.

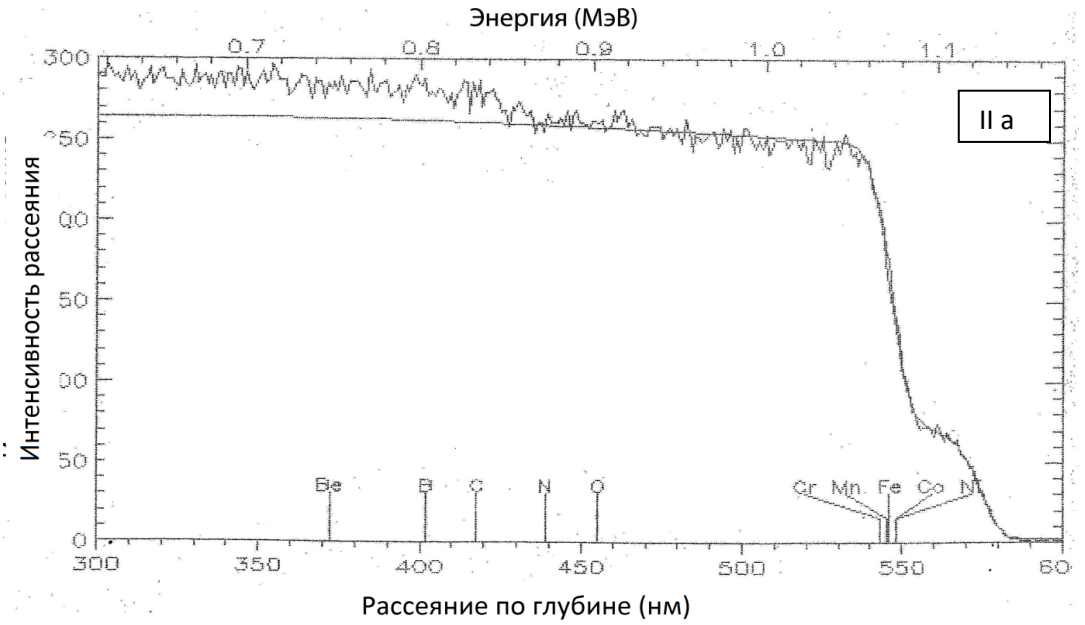
В результате исследований образцов были полученные данные, свидетельствующие о распределении концентрации элементов диффузионного дискретного оксидного слоя по глубине приповерхностного слоя (атм. %), (см. таблицы к рисункам 5.1 – 5.3).



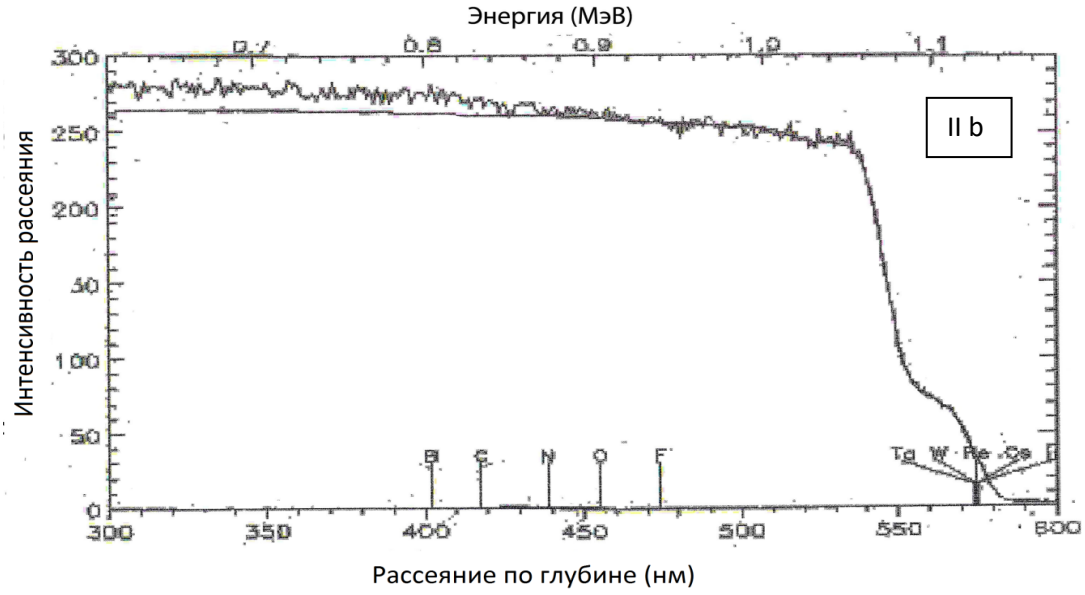
Thickness	Composition . . .					
10000.00 A	Fe	0.840	W	0.035	Mo	0.020
	Cr	0.030	V	0.035	Co	0.040
	C	0.010				



	Thickness	Composition . . .					
		C	1.0000	O	1.0000		
1	400.00 A	Fe	0.760	W	0.035	Mo	0.030
2	10000.00 A	Cr	0.020	V	0.025	Co	0.040
		C	0.100				

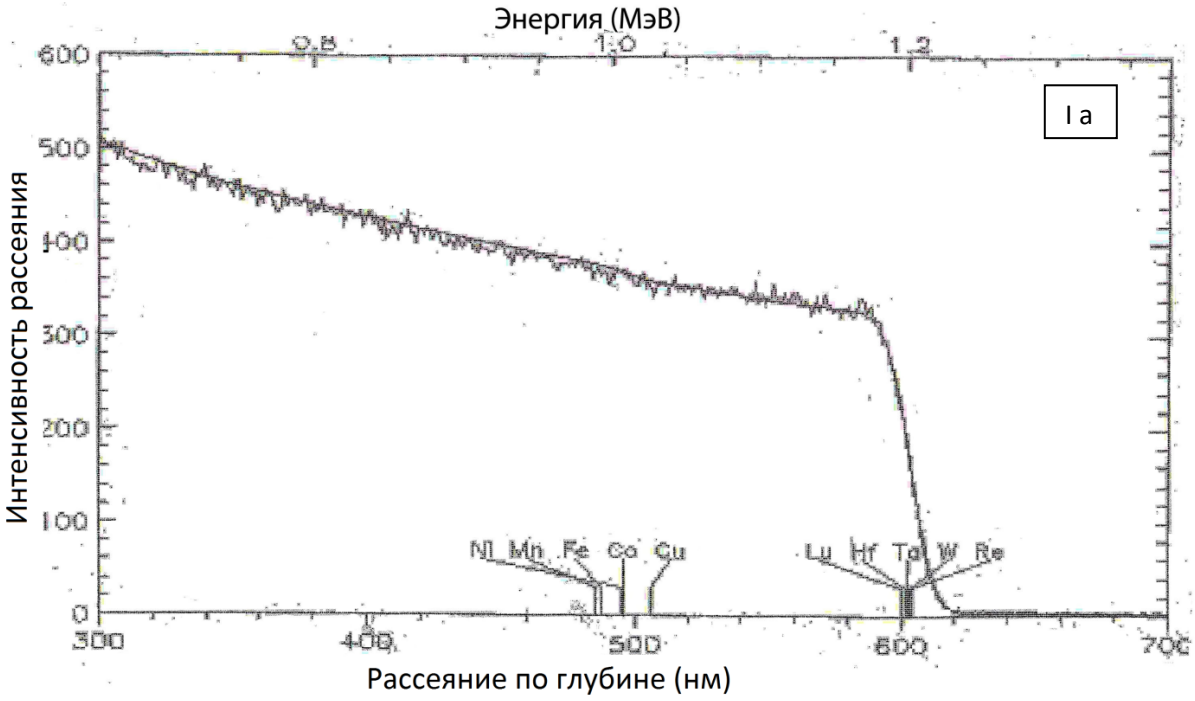


	Thickness	Composition					
1	50000.00 A	Fe	0.840	W	0.040	Mo	0.020
		Cr	0.030	V	0.030	Co	0.040
		C	0.010				

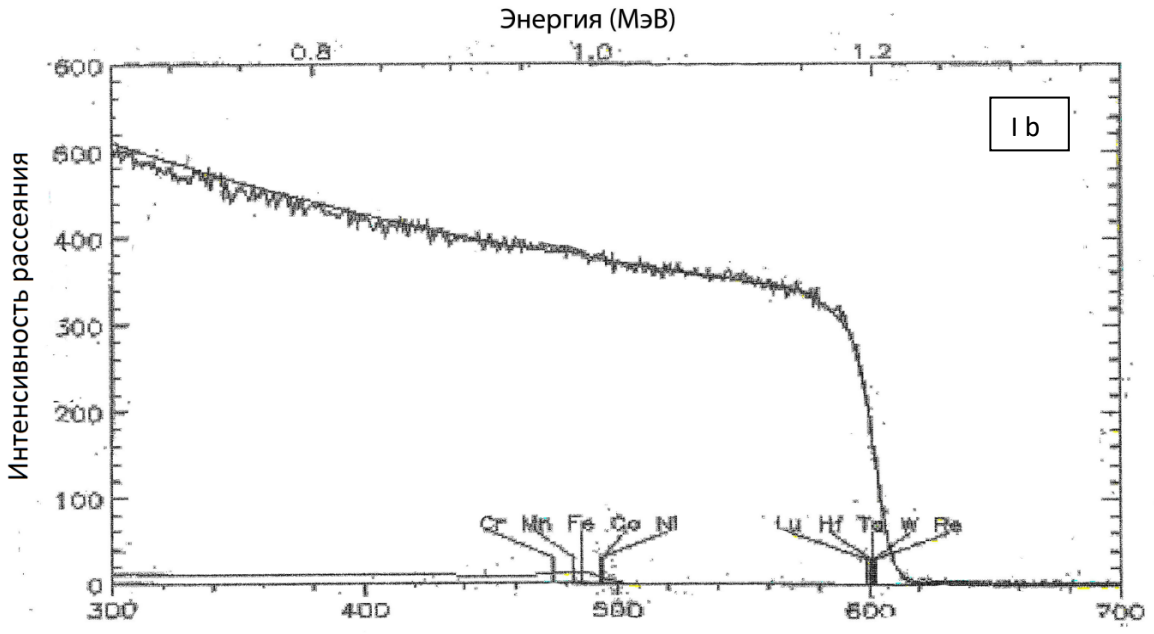


	Thickness	Composition					
1	3000.00 A	Fe	0.760	W	0.040	Mo	0.020
		Cr	0.030	V	0.030	Co	0.040
		C	0.010	O	0.080		
2	50000.00 A	Fe	0.840	W	0.040	Mo	0.020
		Cr	0.030	V	0.030	Co	0.040
		C	0.010				

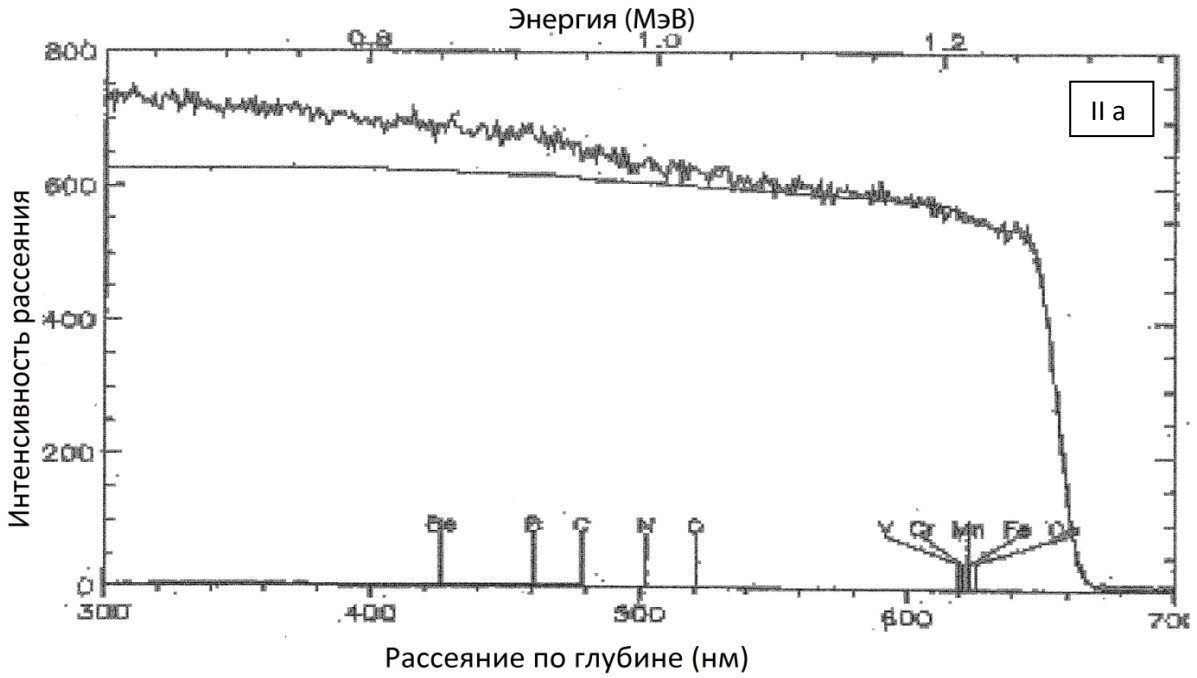
Рисунок 5.1 – Оценка толщины оксидного слоя на быстрорежущей стали с использованием спектра рассеяния ионов: I – спектр рассеяния ионов гелия He^+; II – спектр рассеяния ионов водорода H^+; а – до нанесения оксидного слоя; б – после нанесения оксидного слоя



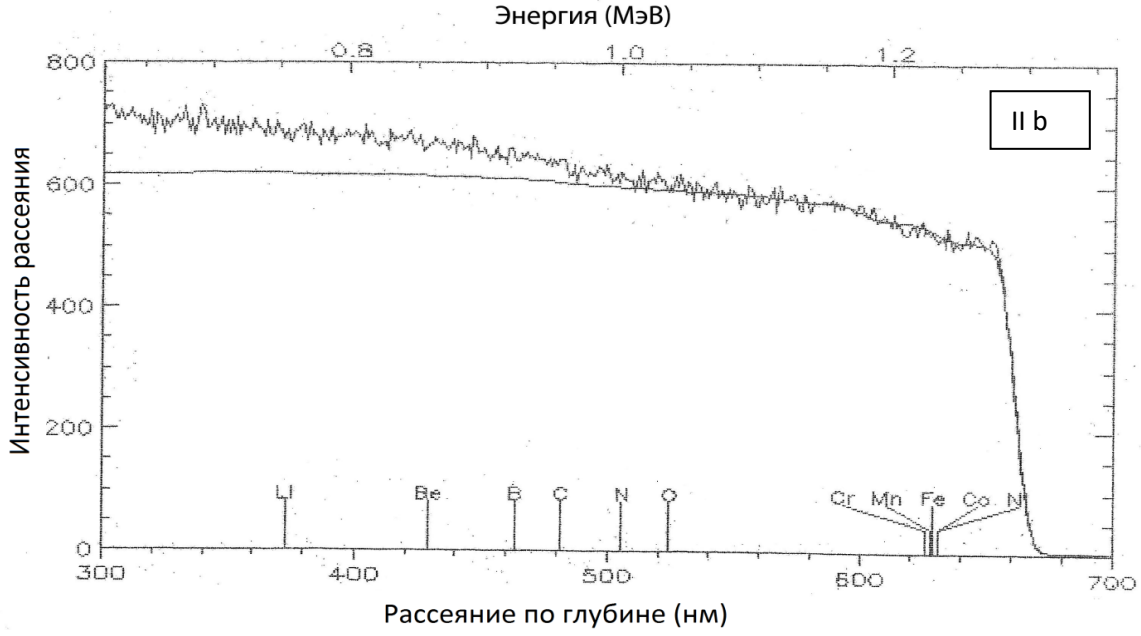
	Thickness	Composition	. . .			
1	40000.00 A	W	0.460	C	0.550	Co	0.090



	Thickness	Composition	. . .			
1	250.00 A	W	0.420	C	0.500	Co	0.150
2	1100.00 A	W	0.460	C	0.480	Co	0.090
3	40000.00 A	W	0.460	C	0.550	Co	0.090

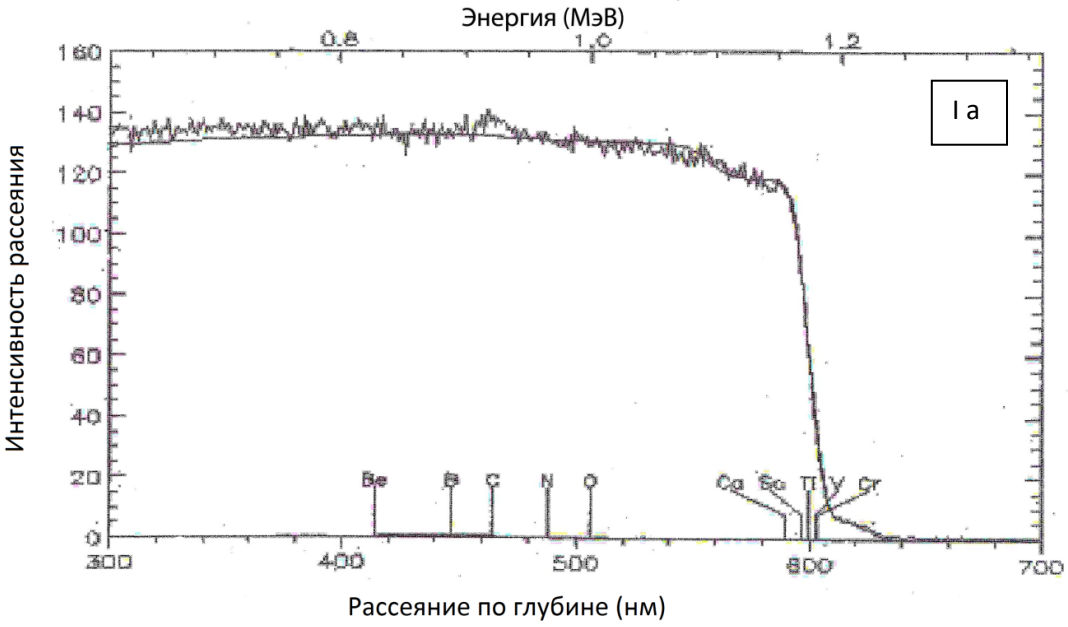


Thickness Composition . . .
1 40000.00 A W 0.440 C 0.400 Co 0.120
Cr 0.090

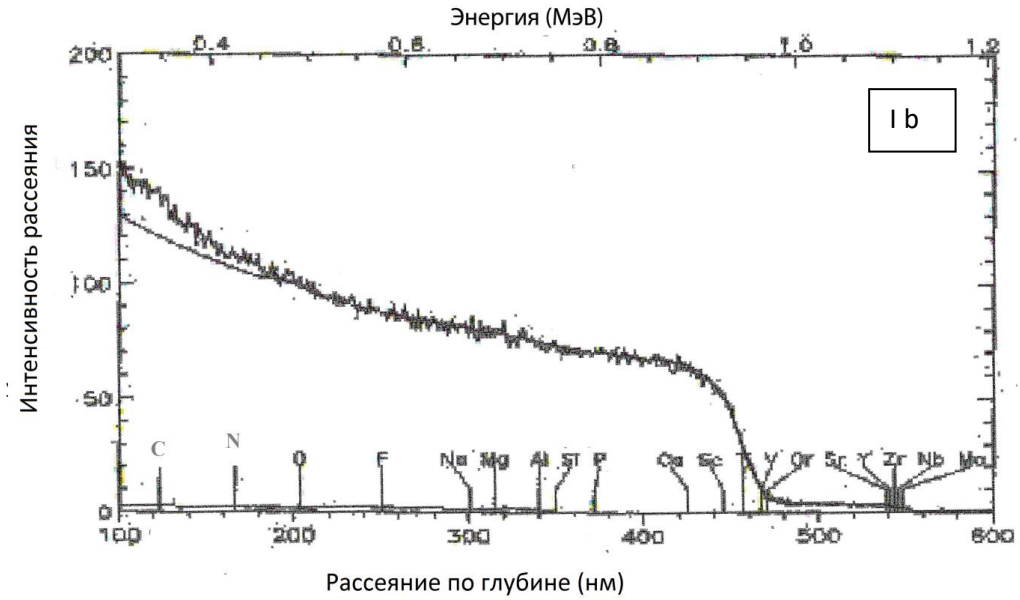


Thickness Composition . . .
1 6000.00 A W 0.440 C 0.580 Co 0.100
Cr 0.090
2 40000.00 A W 0.440 C 0.400 Co 0.120
Cr 0.090

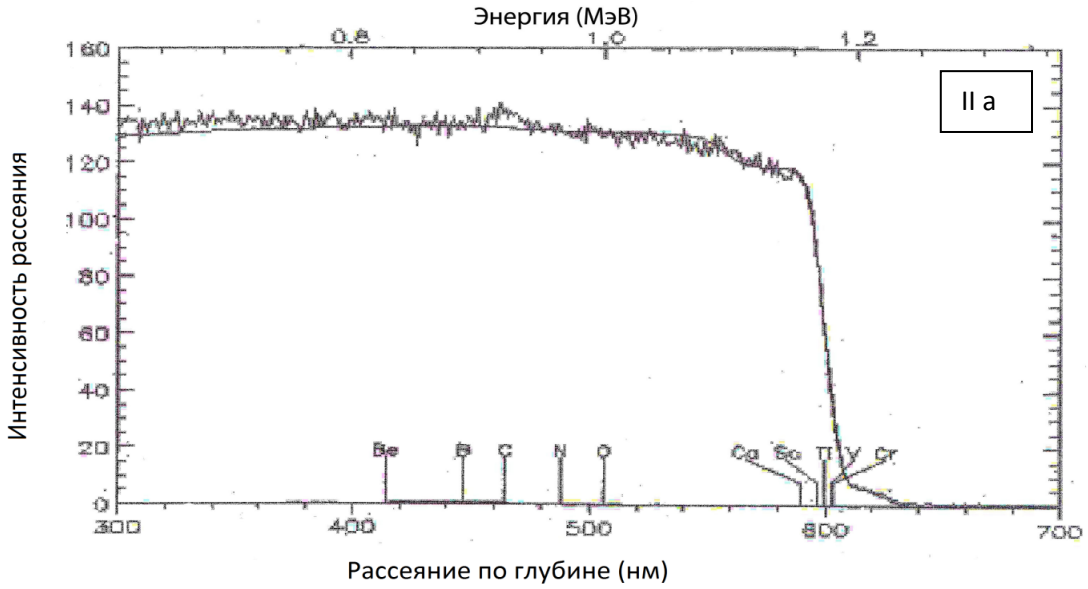
Рисунок 5.2 – Оценка толщины оксидного слоя на твердом сплаве с использованием спектра рассеяния ионов: I – спектр рассеяния ионов гелия He^+; II – спектр рассеяния ионов водорода H^+; а – до нанесения оксидного слоя; б – после нанесения оксидного слоя



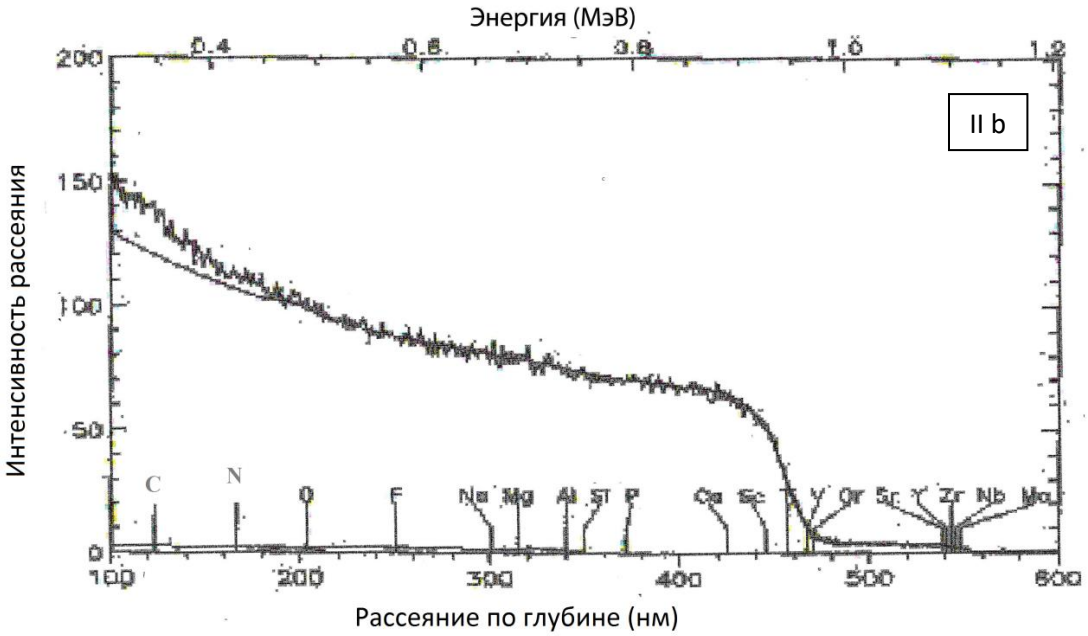
	Thickness	Composition					
1	10000.00 A	Ti	0.900	Mo	0.015	Al	0.070
		Cr	0.015				



	Thickness	Composition					
1	500.00 A	Ti	0.600	Mo	0.015	Al	0.070
		Cr	0.015	O	0.300		
2	10000.00 A	Ti	0.900	Mo	0.015	Al	0.070
		Cr	0.015				



	Thickness	Composition					
1	7000.00 A	Ti	0.790	Mo	0.012	Al	0.100 0
		Cr	0.015	C	0.080		
2	60000.00 A	Ti	0.870	Mo	0.012	Al	0.100 0
		Cr	0.015				



	Thickness	Composition					
1	7000.00 A	Ti	0.790	Mo	0.012	Al	0.100
		Cr	0.015	C	0.080		
2	60000.00 A	Ti	0.870	Mo	0.012	Al	0.100
		Cr	0.015				

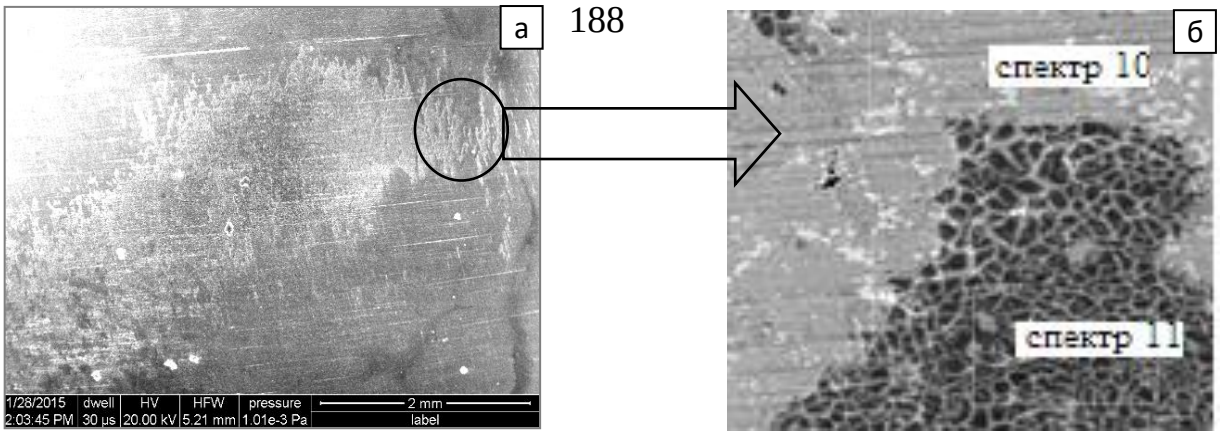
Рисунок 5.3 – Оценка толщины оксидного слоя на титановом сплаве с использованием спектра рассеяния ионов: I – спектр рассеяния ионов гелия He^+; II – спектр рассеяния ионов водорода H^+; а – до нанесения оксидного слоя; б – после нанесения оксидного слоя

Анализ спектров на рисунках 5.1-5.3 показывает, что получаемые данные отличаются, в зависимости от того, были ли использованы ионы гелия или водорода для оценки распределения элементов. Так, например, при воздействии ионов He^+ на образец из быстрорежущей стали (см. рисунок 5.1) выявлено изменение содержания элементов на глубине 400 нм, а при воздействии ионов H^+ изменение содержания элементов отмечено на глубине 300 нм. При воздействии ионов He^+ на образец из твердого сплава (см. рисунок 5.2) на глубине 250 нм выявлено изменение содержания элементов, при воздействии ионов H^+ заметного изменения содержания элементов не отмечено. При воздействии ионов He^+ на образец из титанового сплава (см. рисунок 5.3) на глубине 50 нм отмечено изменение содержания элементов, а при воздействии ионов H^+ изменение содержания элементов отмечено на глубине 700нм.

5.2 Исследование химического состава диффузионного дискретного оксидного слоя на различные материалы

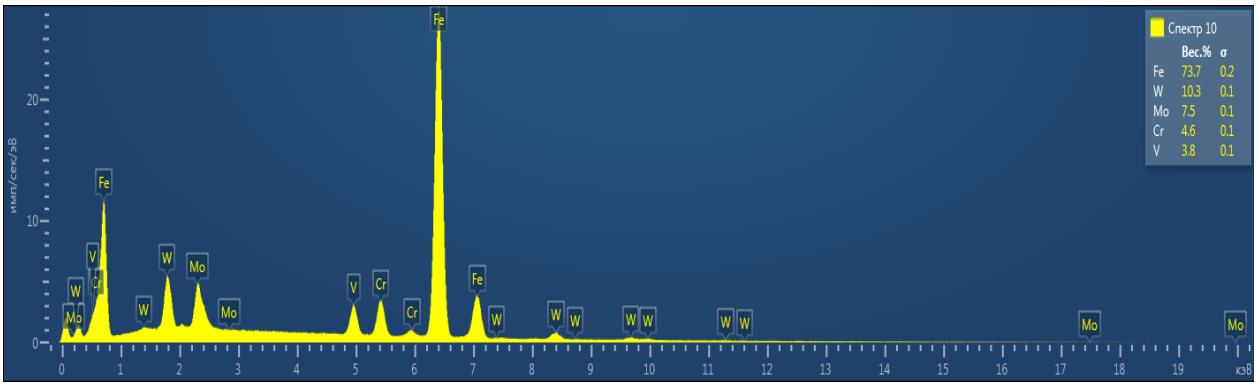
Определяли методом микрорентгеновского спектрального анализа (МРСА) химический состав оксидного диффузионного слоя быстрорежущих и твердосплавных пластин с пошаговым сканированием образца электронным зондом в направлении, перпендикулярном боковой поверхности образца в сечении микрошлифа.

На рисунке 5.4 приведены изображения участков пластины из стали Р6М5, где был сформирован оксидный слой. На рис.5.5. представлены спектры, характеризующие химический состав участка без оксидного слоя (спектр 10) и состав участка оксидным слоем (спектр 11). Данные МРСА сопоставлены с марочным химическим составом стали Р6М5.

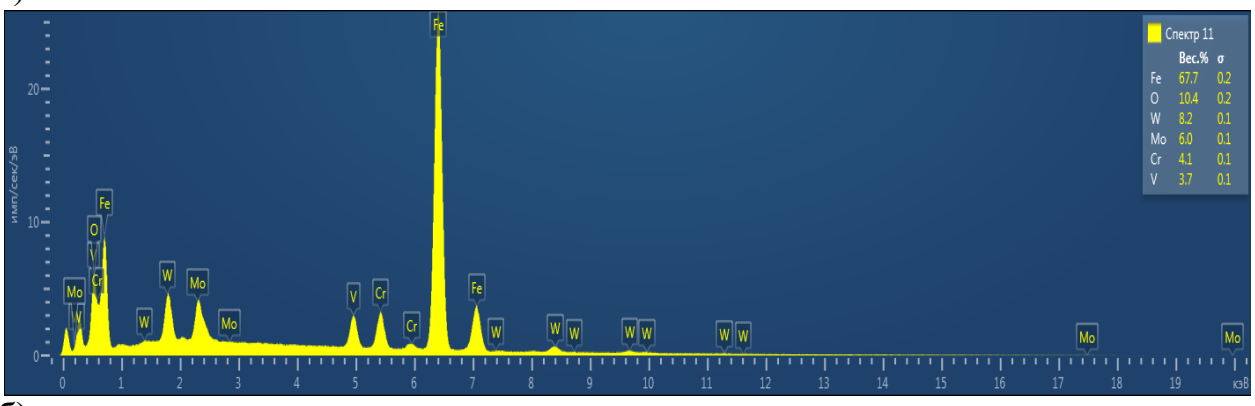


Объект	O	V	Cr	Fe	Mo	W
P6M5 (справ. Данные)	0%	1.7-2.1%	3.8-4.4%	83-85%	5-5.5%	5.5-6%
Участок «Спектр 10»	0%	3.84%	4.6%	73.7%	7.5%	10.3%
Участок «Спектр 11»	10.41%	3.74%	4.1%	67.7%	6.0%	8.2%

Рисунок 5.4 – Микроструктура поверхности образца с дискретным оксидным слоем (а - х300; б - х500)



а)



б)

Рисунок 5.5 – Спектрограмма дискретного оксидного слоя для быстрорежущей стали P6M5: а) без дискретного оксидного слоя; б) с дискретным оксидным слоем.

На рисунке 5.6 показана спектральная структура покрытия твердого сплава, а результат химического анализа содержания элементов диффузионного дискретного оксидного слоя в образцах (контрольный образец без дискретного оксидного слоя – спектр 1) и (образец с диффузионным дискретного оксидного слоя – спектр 2 и спектр 4) представлен на рисунке 5.7.

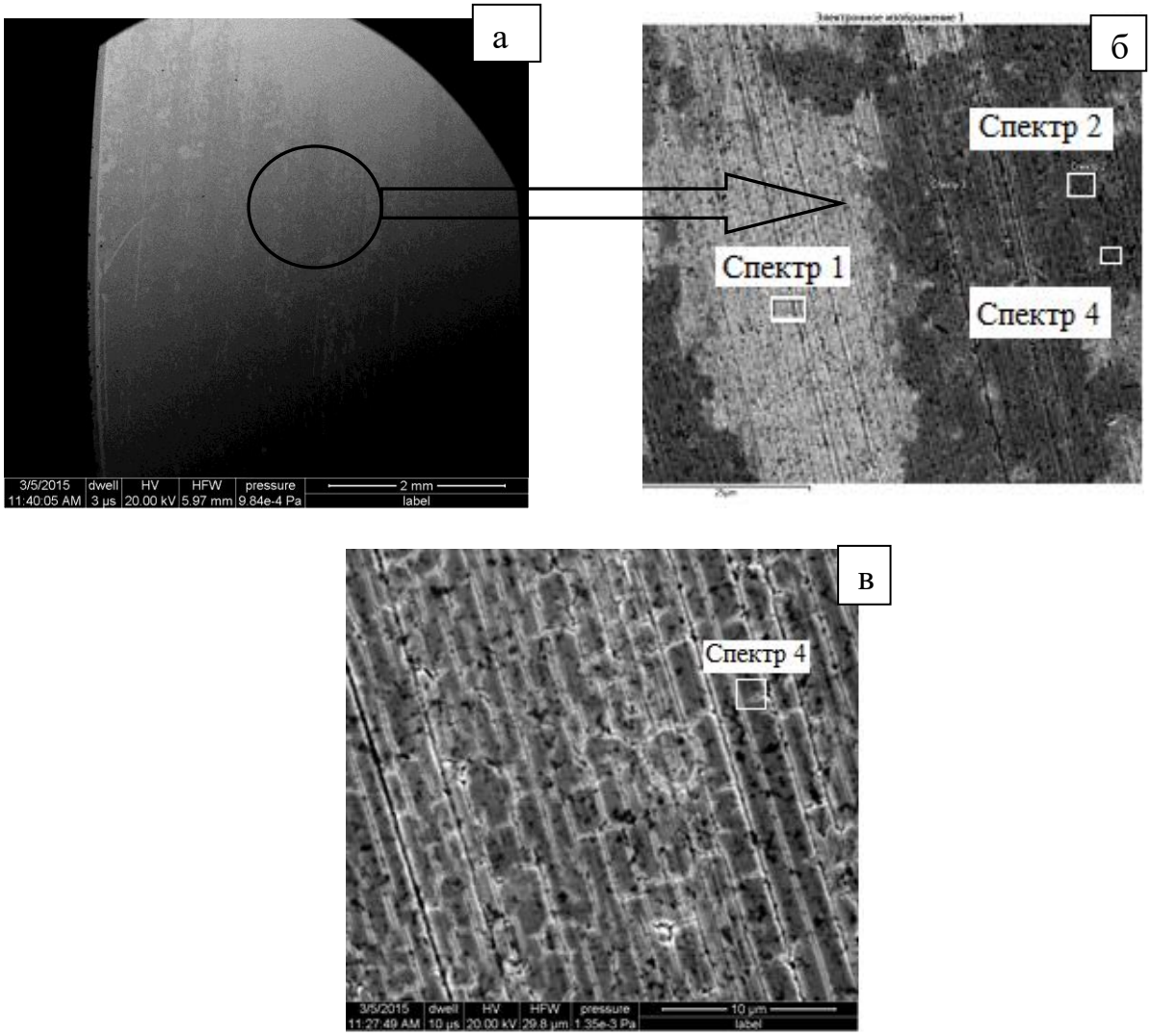
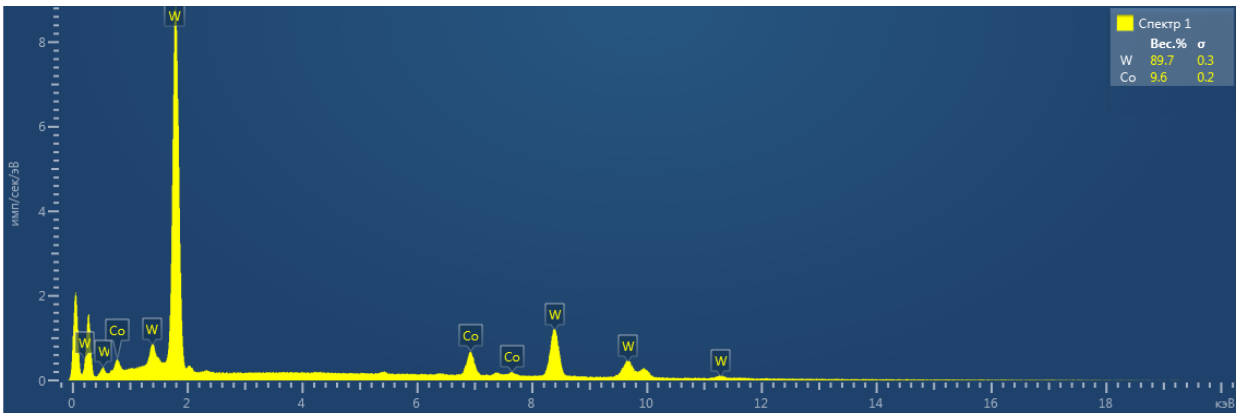
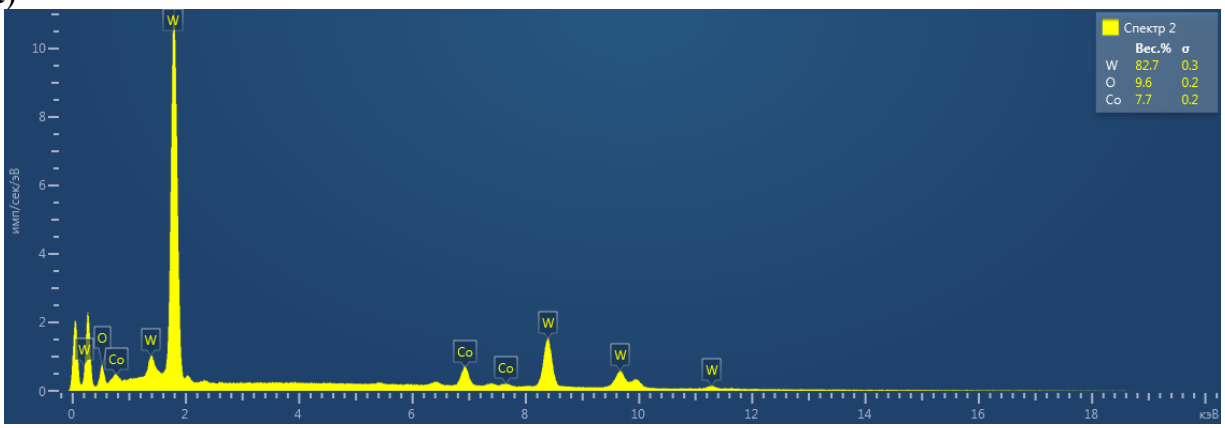


Рисунок 5.6 – Микроструктура поверхности образца с дискретным оксидным слоем (а - х25, б - х500, в - х5000)

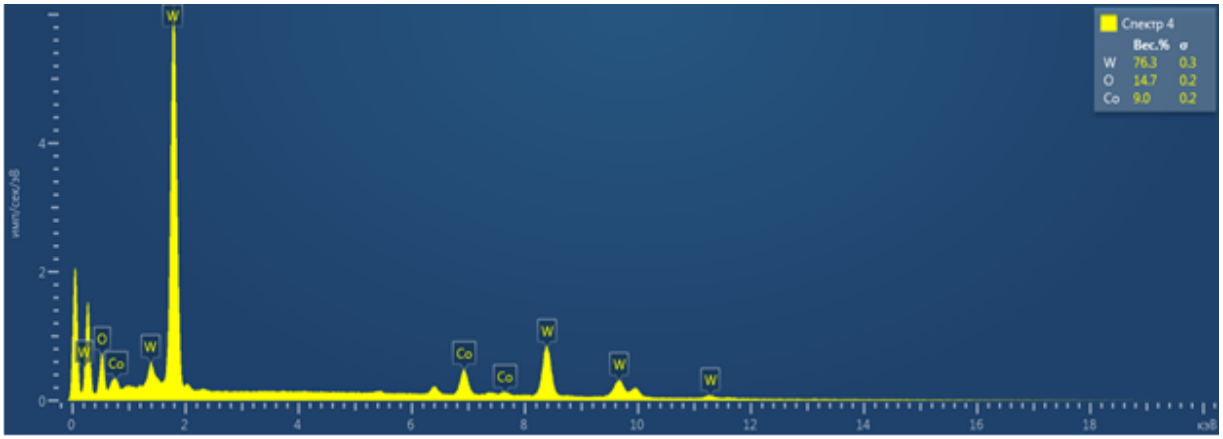
Объект	O	Co	W	TaC
ВК10ХОМ (справ. Данные)	0%	10%	88%	2%
Участок «Спектр 1»	0%	9,6%	88,7	-
Участок «Спектр 4»	14.7	9.0%	76.3%	-



а)



б)



в)

Рисунок 5.7 – Спектрограмма дискретного оксидного слоя твердосплавной пластины ВК10ХОМ: а) без дискретного оксидного слоя; б, в) с дискретным оксидным слоем.

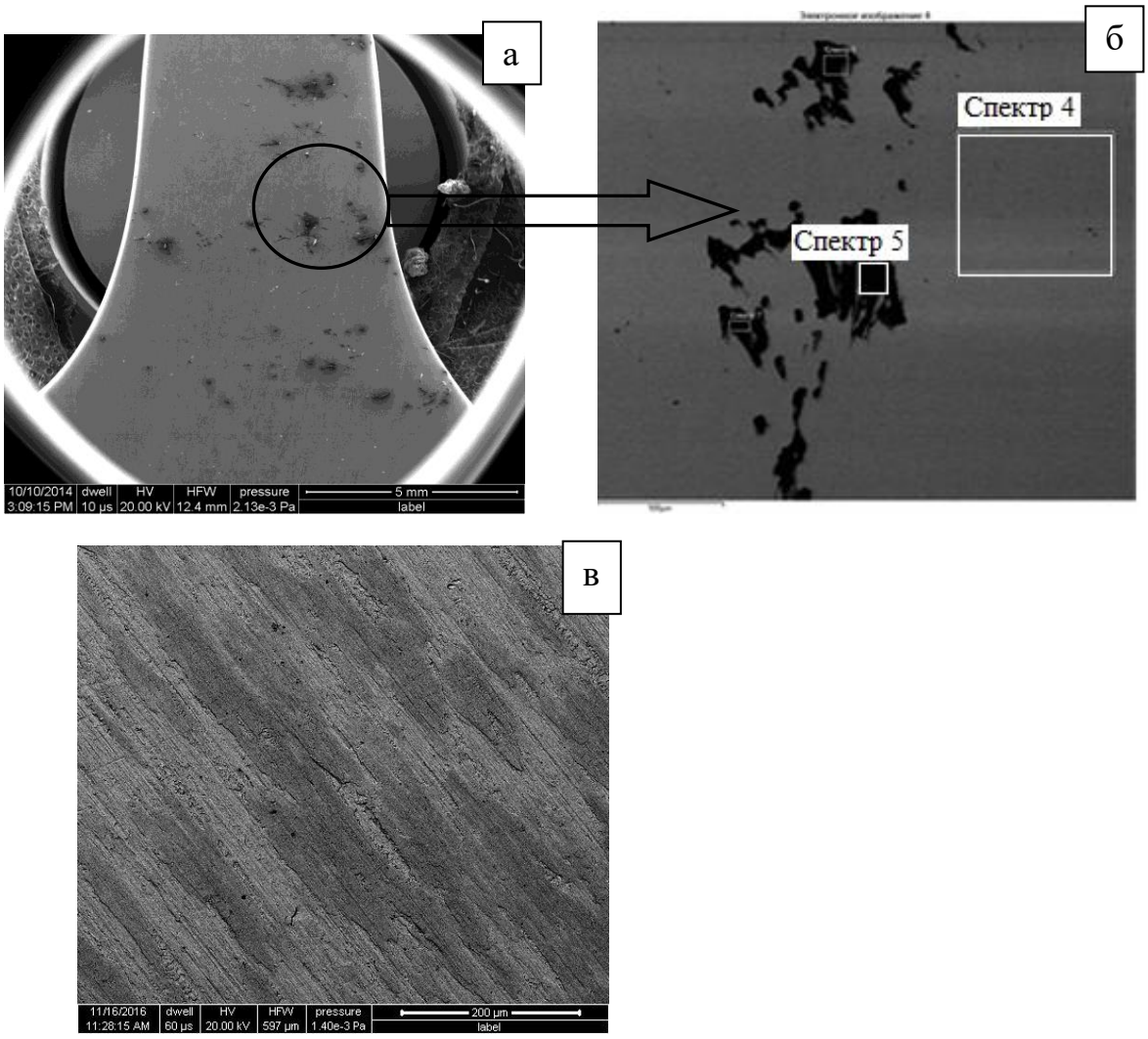
Рентгеноспектральным анализом получено распределение элементов по глубине материала с дискретным оксидным слоем. Установлено, например, для быстрорежущего инструмента, что в покрытии присутствуют Fe, Cr, W, V, Mo, Co, O, C, (см. рисунок 5.1). На глубине 300нм содержание Fe

составляет 76%, тогда как на глубине 5 000нм - 84%. Содержание Cr, W, V, Mo, Co практически не изменялось, в то ж время установлено, что кислород присутствует только в поверхностном слое покрытия и содержание кислорода составляет, примерно, 0,08% (см. рисунок 5.1 и 5.5). Таким образом, можно утверждать, что уменьшение содержания, Fe в поверхностном слое обусловлено протеканием процесса окисления и образования оксидов Fe_xO_y. Микрорентгеноспектральным анализом (см. рисунок 5.5) подтверждено существенное уменьшение содержания Fe в покрытии. Микрорентгеноспектральный анализ, проводившийся на сканирующем электронном микроскопе, показал, что покрытие, полученное диффузионным способом, имеет поликристаллическую структуру (см. рисунок 5.4), при этом размер зерна составляет примерно 4 мкм.

Рентгеноспектральным анализом получено распределение элементов по глубине материала покрытия, например, для твердосплавного инструмента, что в покрытии присутствуют W, Co, O, (см. рисунок 5.2 и 5.7). На глубине 250нм содержание W составляет 76%, тогда как на глубине 4 000нм - 90%. Содержание Co практически не изменилось, в то же время установлено, что кислород присутствует только в поверхностном слое покрытия и содержание кислорода составляет, примерно, 0,09% (см. рисунок 5.7). Таким образом, можно утверждать, что уменьшение содержания, W в поверхностном слое обусловлено протеканием процесса окисления и образования оксидов W_xO_y. Микрорентгеноспектральным анализом (см. рисунок 5.6) подтверждено существенное уменьшение содержания W в покрытии. Микрорентгеноспектральный анализ, проводившийся на сканирующем электронном микроскопе, показал, что дискретный оксидный слой, полученный диффузионным способом, имеет локальную структуру (см. рисунок 5.6), при этом размер зерна составляет примерно 4 мкм.

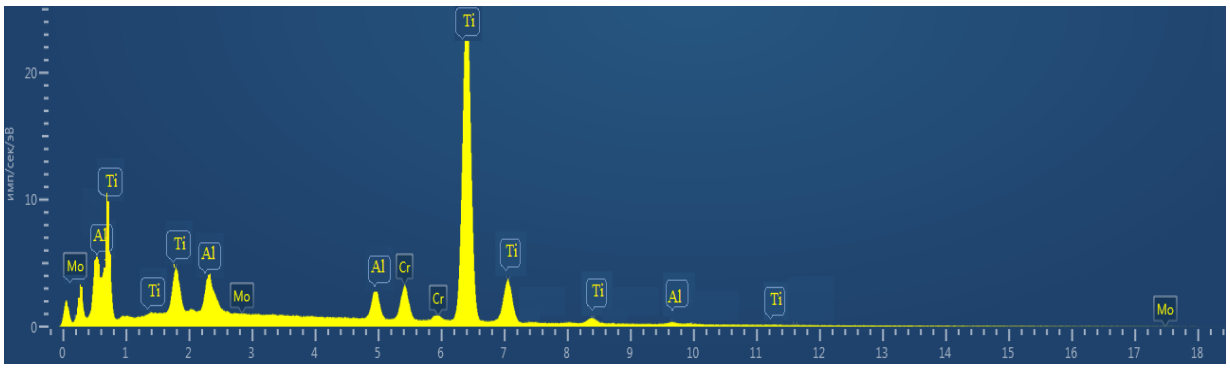
На рисунке 5.8 показана спектральная структура дискретного оксидного слоя титанового сплава, а результат химического анализа содержания элементов диффузионного дискретного оксидного слоя в образцах

(контрольный образец без покрытия – спектр 4) и (образец с диффузионным дискретным оксидным слоем – спектр 5) представлен на рисунке 5.9.

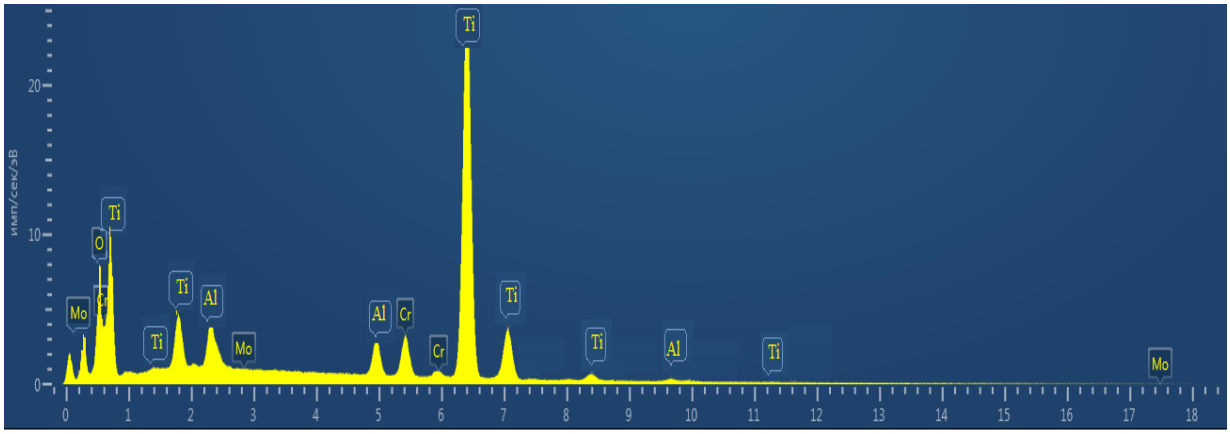


Объект	O	Al	Ti	Cr	Mo	Fe	Si	Zr
ВТ3-1 (справ. Данные)	0%	5.5-7%	89.9-91%	0.8-2%	2-3%	0.2-0.7%	0.15-0.4%	0.5%
Участок «Спектр 1»	0%	5.96%	90%	0,8 %	2%			
Участок «Спектр 5»	24.21 %	5.96%	67.3%	0,8 %	2%			

Рисунок 5.8 – Микроструктура поверхности образца с дискретным оксидным слоем (а - х25, б - х500, в – х3000)



а)



б)

Рисунок 5.9 – Спектрограмма дискретного оксидного слоя титанового сплава ВТ3-1: а – без дискретного оксидного слоя; б – с дискретным оксидным слоем

Рентгеноспектральным анализом было также получено распределение элементов по глубине материала оксидного слоя нанесенного на «образец детали». Установлено, например, для титанового сплава, что в дискретном оксидном слое присутствуют Ti, Cr, Mo, Al, O, (см. рисунок 5.3 и 5.8). На глубине 50нм содержание Ti составляет 67,3%, тогда как на глубине 1 000нм - 91,2%. Содержание Cr, Mo, Al практически не изменялось, в то же время установлено, что кислород присутствует только в поверхностном слое покрытия и содержание кислорода составляет, примерно, 0,3% (см. рисунок 5.3 и 5.8). Таким образом, можно утверждать, что уменьшение содержания, Ti в поверхностном слое обусловлено протеканием процесса окисления и образования оксидов Ti_xO_y. Микрорентгеноспектральным анализом (см. рисунок 5.9) подтверждено существенное уменьшение содержания Ti в

покрытии. Микрорентгеноспектральный анализ, проводившийся на сканирующем электронном микроскопе, показал, что дискретный оксидный слой, полученный диффузионным способом, имеет поликристаллическую структуру альфированного типа (см. рисунок 5.9).

5.3 Исследование фазового состава дискретного диффузионного упрочнения на различные материалы

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. В том числе установлено, что на поверхности сплава ВК10ХОМ присутствуют оксиды: триоксид вольфрама WO_3 (α); WO_3(β), WO_3 (γ); диоксид вольфрама WO_2(δ); оксид кобальта (II, III) Co_3O_4 и оксид кобальта (II) CoO, о чем свидетельствуют цвета побежалости, (см. рисунок 5.10).

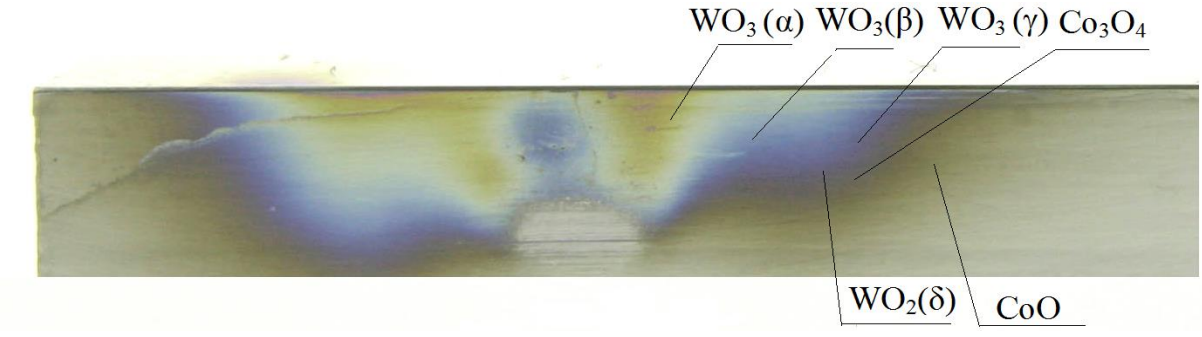
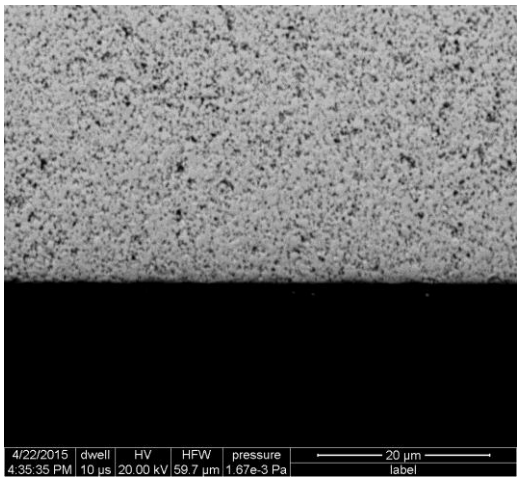


Рисунок 5.10 – Цвета побежалости дискретного оксидного слоя на поверхности твердого сплава и их соответствие оксидным фазам.

Таким образом, данный дискретный оксидный слой представляет собой тонкую твердую плёнку, состоящую преимущественно из оксидов вольфрама. При этом структура основного металла не претерпевает заметных изменений в поверхностном слое (см. рисунок 5.11). С увеличением % содержания кислорода в покрытии до 14,7 %, поскольку процесс происходит при ионизации коронного разряда, ионы кислорода взаимодействуют с атомами W и Co и образуют тонкую оксидную пленку. Триоксид WO_3 имеет триклинную решетку α, которая переходит в устойчивую моноклинную β и затем ромбическую γ - фазу. При температуре 740°С оксид вольфрама из γ-фазы переходит в δ-WO_3, который имеет тетрагональную решетку. Оксиды кобальта Co_3O_4 и CoO имеют кубическую решетку. Следует отметить, что оксиды имеют вакансии в узлах решетки, например: в W_xO_{3n-2}, Co_xO_{3n-2} имеется катионная вакансия, за счет энергетических флуктуаций, один из атомов может получить от соседних энергию, достаточную для его выхода из узла решетки, т.е. на месте одного иона W^+ образуется два иона W^+ в двух других узлах. Таким образом, любой кристалл, находящийся при температуре, отличной от нуля, всегда будет содержать определенное число указанных тепловых дефектов.



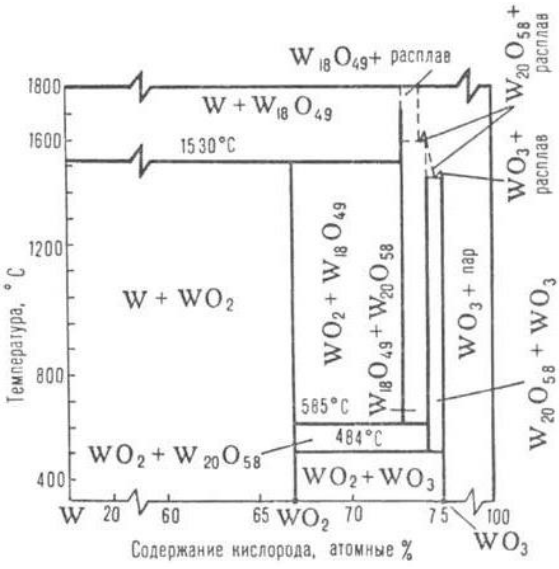


Рисунок 5.11 – Структура и диаграмма состояния вольфрам-кислород W-O дискретного оксидного слоя

В результате исследования на быстрорежущем материале Р6М5 видно, что в состав покрытия входят следующие оксиды: FeO, Fe_3O_4 и Fe_2O_3 о чем свидетельствуют цвета побежалости на быстрорежущем образце, (см. рисунок 5.12). Кислород внедряется в кристаллическую решетку вольфрама, железа, образуя твердые растворы, и тем самым повышается твердость и прочность тонкой пленки на поверхности инструментального материала. При повышении температуры оксиды переходят в более стабильное состояние, соответствующее более высокому содержанию кислорода в металле. Таким образом, данное покрытие состоит из оксидов, имеющих нестехиометрическую структуру, что способствует увеличению прочности поверхностной пленки покрытия на инструментальном материале, не изменяя структуру субстрата (см. рисунок 5.13). Это можно объяснить увеличением содержания кислорода в покрытии до 10,4%, при ионизации коронного разряда, когда ионы кислорода принудительно внедряются в решетку.

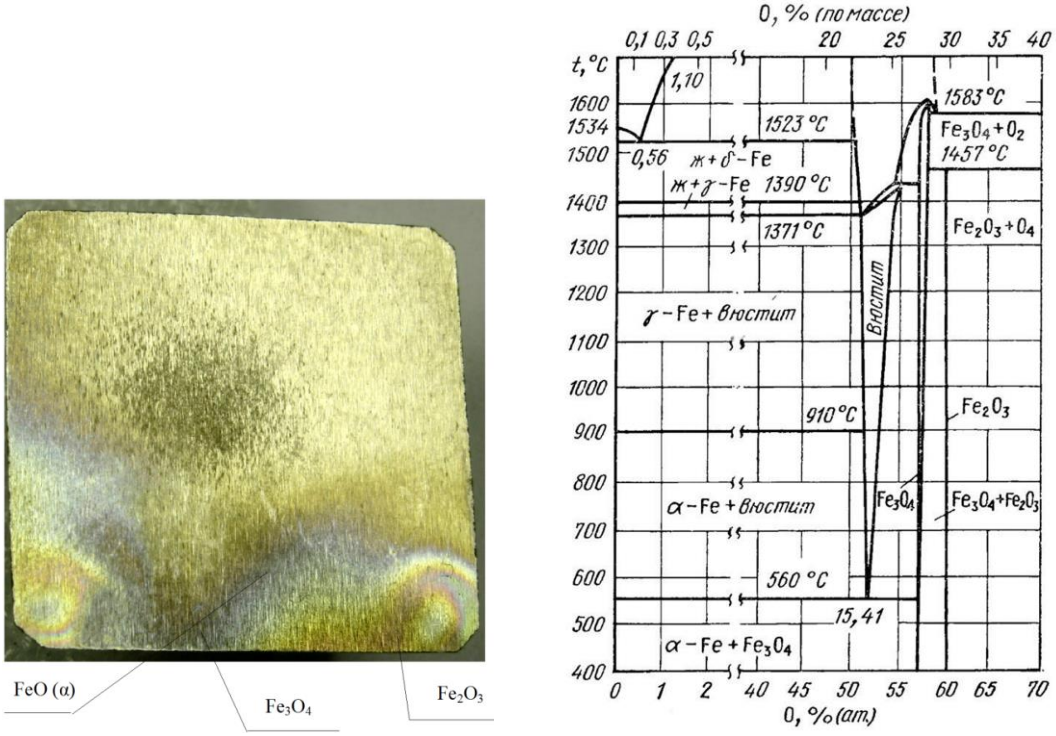
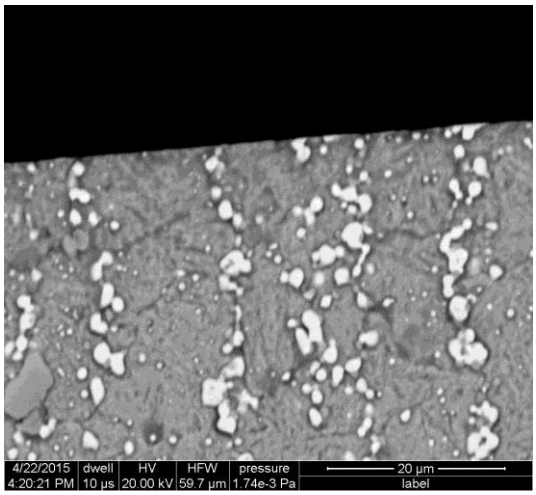


Рис. 5.12 – Цвета побежалости дискретного оксидного слоя на поверхности быстрорежущей стали и их соответствие оксидным фазам



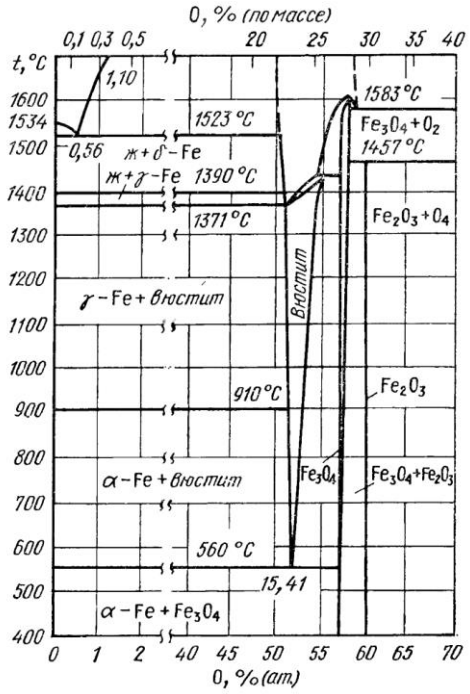


Рисунок 5.13 – Структура и диаграмма состояния железа кислород Fe-O дискретного оксидного слоя

Чередование оксидов на поверхности металла связано с разным процентным содержанием кислорода. Вначале, при ионизации молекул кислорода происходит образование гематита (Fe_2O_3). Затем, по мере возрастания температуры инструмента при механической обработке деталей и снижении концентрации кислорода под слоем гематита образуется слой магнетита (Fe_3O_4) и ниже слой вюстита ($Fe_{1-x}O$). Таким образом, чем выше температура, тем больше в окалине вюстита и меньше гематита. Металл переходит в термодинамически неустойчивое неравновесное состояние с повышенной внутренней энергией. По сути, металл аккумулирует энергию, затраченную при его деформации. Эта скрытая энергия распределена в металле неравномерно, и, в основном, сконцентрирована в дефектах кристаллической решетки. Поверхность металла заполняется хемосорбированным окислителем почти мгновенно и образуется тонкий слой окисленного вещества. При пониженных температурах после хемосорбированного окислителя за счет ванн-дер-ваальсовых сил может возникнуть и физическая адсорбция молекул окислителя. Если между

металлом и окислителем есть химическое сродство (оксид термодинамически стабильный), то пленка, состоящая из хемосорбированного окислителя, превращается в оксидную пленку. Металл и окислитель в оксидной пленке поддерживают ионную связь. В таком случае очень быстро возникает слой хемосорбированного кислорода и в то же время в оксидах формируется значительное электрическое поле. На поверхности раздела Me-MeO образуются катионы, а на поверхности раздела $MeO-O_2$ образуются анионы кислорода или другого окислителя. Электрическое поле способствует миграции катионов к поверхности раздела $MeO-O_2$.

У оксида железа Fe_xO (x ~ 0,84-0,96) имеется катионная вакансия. За счет энергетических флуктуаций один из атомов железа может получить от соседних атомов энергию, достаточную для его выхода из узла решетки. Появление каждой катионной вакансии на месте иона Fe^{2+} сопровождается образованием двух ионов Fe^{3+} в двух других узлах для компенсации зарядов. Таким образом, любой кристалл, находящийся при температуре, отличной от нуля, всегда будет содержать определенное число указанных тепловых дефектов.

Из выше сказанного можно отметить, что любые точечные дефекты обладают способностью к миграции (диффузии) в кристаллической решетке в результате тепловой флуктуации или приложения к кристаллу внешнего электрического поля. Точечные дефекты могут взаимодействовать друг с другом, образуя в простейшем случае ассоциаты — дефекты, занимающие соседние кристаллографические позиции. Поочередное перемещение атомов может быть представлено как движение дислокации. Для перемещения дислокации достаточно напряжений, много меньших, чем для перемещения всего атомного слоя сразу. Первоначально имевшаяся дислокация под воздействием, созданных в кристалле напряжений перемещается вдоль кристалла. Это перемещение сопровождается поочередным сдвигом атомов слоя, лежащего над дислокацией, относительно атомов слоя, лежащего под дислокацией [76, 77, 78, 79].

Перемещению дислокаций препятствует наличие других дефектов в кристалле, например, присутствие атомов примеси. Дислокации тормозятся также при пересечении друг с другом. Если количество дислокаций и других дефектов в кристалле мало, то дислокации перемещаются практически свободно. В результате сопротивление сдвигу будет невелико. Увеличение плотности дислокаций и возрастание концентрации примесей приводит к сильному торможению дислокаций и прекращению их движения. В результате прочность материала растет. Так, например, повышение прочности вольфрама, железа достигается растворением в нем атомов кислорода. Пластическая деформация сопровождается сдвигом атомов кристаллической решетки и образованием большого количества дефектов, препятствующих перемещению дислокаций. Этим объясняется упрочнение материалов при их обработке [76, 77, 78, 79]. Образование дислокаций вызвано присутствием в кристаллической решетке неполных кристаллографических плоскостей, о чем свидетельствует мозаичная структура кристаллов (см. рисунки 5.4б и 5.6в).

5.4 Исследование физико-механических свойств материалов с диффузионным дискретным оксидным слоем

Для определения физических свойств локального диффузионного дискретного оксидного слоя были проведены исследования по определению микротвердости, шероховатости и модуля упругости Юнга. Исследование проводили по методике, изложенной в главе 3. В качестве образцов использовали прямоугольные бруски размером 10,0х10,0х60мм. В качестве материала для образцов были использованы: быстрорежущая сталь (Р6М5, Р6М5К5), твердосплавный материал (ВК10ХОМ) и титановый сплав (ВТ3–1).

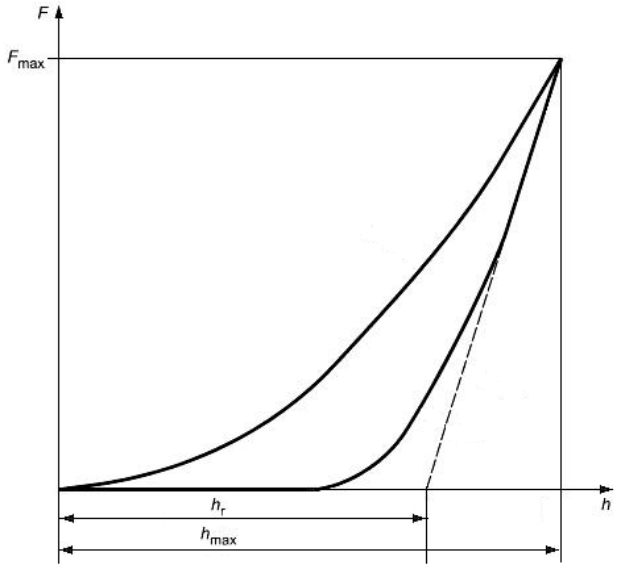
Требования, предъявляемые к образцам, к их конструкции достаточно сложны (см. гл. 3).

В ходе металлофизических и металлографических исследований на сканирующем наноинденторе Hysitron TI 750 Ubi (США), (см. рисунок 3.8) были получены результаты по твердости, модулю упругости в виде модели Оливера-Фарра, которые оценивались согласно ISO 14577, (см. рисунки 5.14 – 5.20). Методика измерения наномеханических испытаний представлена в главе 3. Согласно ГОСТ 8.748-2011 твердость индентирования H_{IT} рассчитывалась по следующей формуле:

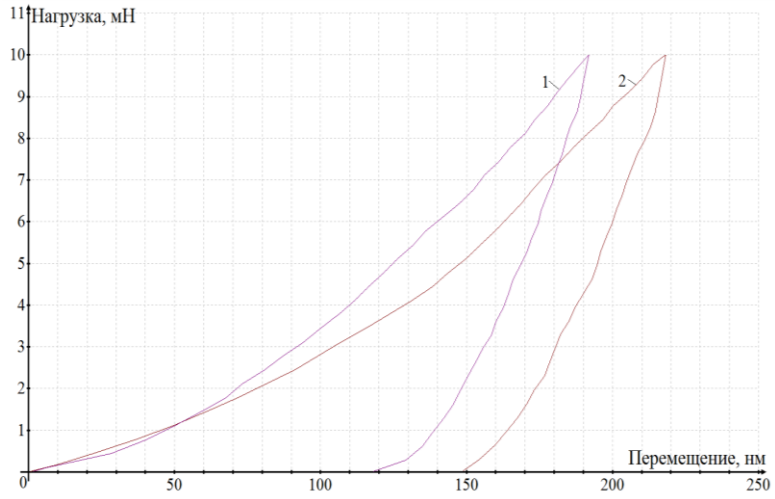
$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{(24{,}5 \cdot h_c^2)},$$

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 5.14)

На рисунке 5.14 показаны схема диаграмма вдавливания (а) и реальная диаграмма вдавливания (б) для стали Р6М5 с дискретным оксидным слоем (1) и без дискретного оксидного слоя (2).



а)



б)

Рисунок 5.14 – Схема диаграмма 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 диффузионным оксидным слоем и без дискретного оксидного слоя рассчитывался по формуле:

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

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 рассчитывается по формуле:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{(2C \cdot 4{,}896 h_c)}$$ (для пирамиды Берковича).

Результаты определения твердости основного металла (стали Р6М5) и покрытий показали, что значения твердости индентирования дискретного оксидного слоя соответствовали H_{IT} 0,01/5/10/20 = 16 304 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 покрытия, среднее значение H_{IT} 0,01/5/10/20 = 12 322Н/мм^2. Твердость покрытия превосходила твердость основного металла на 31%.

Модуль упругости стали Р6М5 с дискретным оксидным слоем E_{IT} составляет 301 110Н/мм^2, в то время, как для основного металла E_{IT} = 199 828Н/мм^2. Таким образом произошло и увеличение E_{IT}, но в большей мере, чем твердость H_{IT} (примерно на 51%).

Данные по твердости, получены ввиде модели Оливера-Фарра, оценивались согласно ISO 14577, (см. рисунки 5.14 – 5.20) и показывают, что диффузионный дискретный оксидный слой толщиной 350 – 600 нм. позволяет значительно увеличить твердость и модуль упругости.

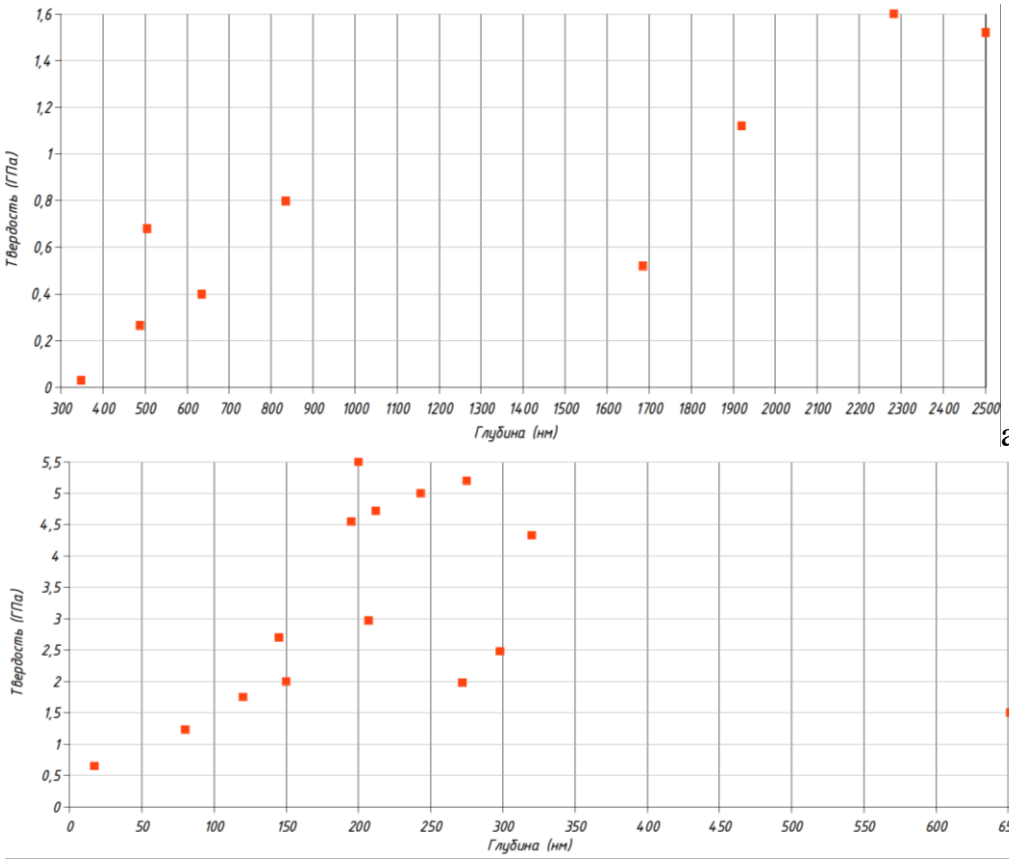
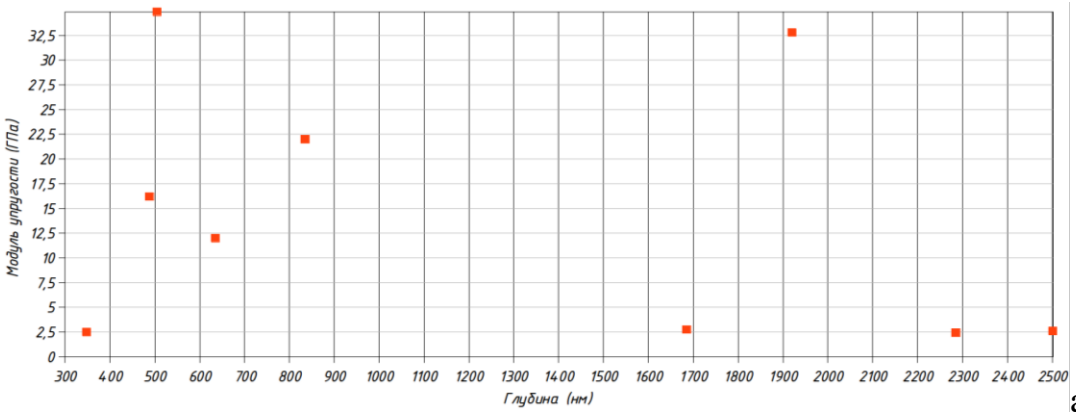
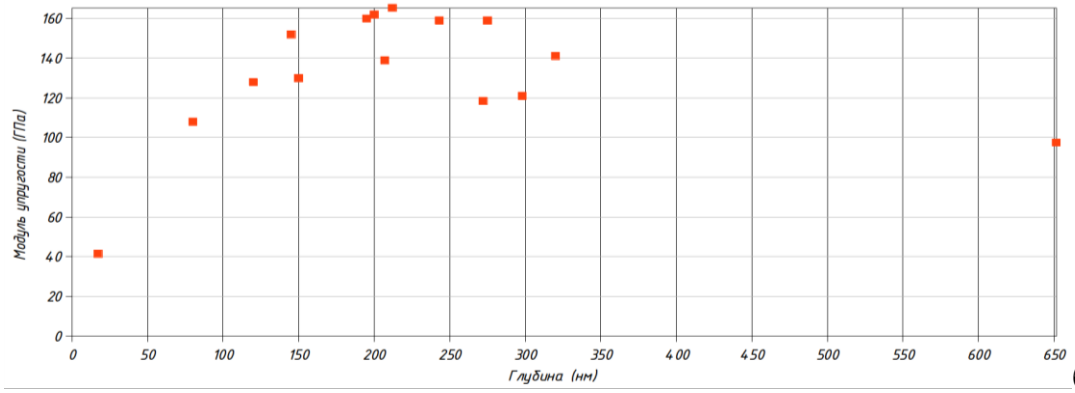


Рисунок 5.15 – Распределение твердости по глубине поверхностного слоя образца из быстрорежущей стали при максимальной нагрузке 12000мкН: а) без дискретного оксидного слоя и б) с дискретным оксидным слоем

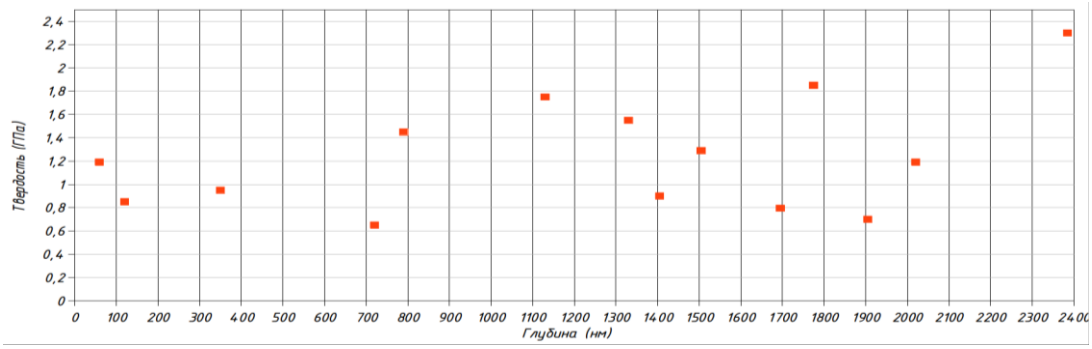


а)

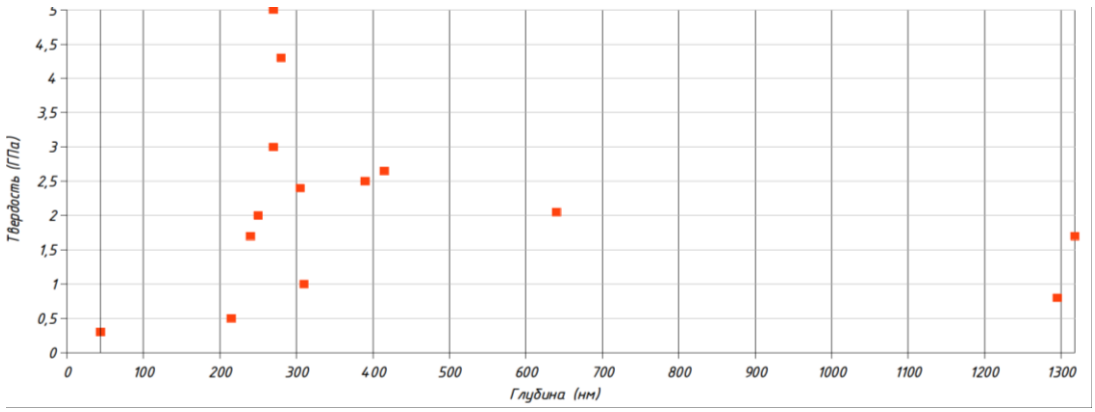


б)

Рисунок 5.16 – Модуль упругости быстрорежущей стали при максимальной нагрузке 12000мкН: а) без дискретного оксидного слоя и б) с дискретным оксидным слоем

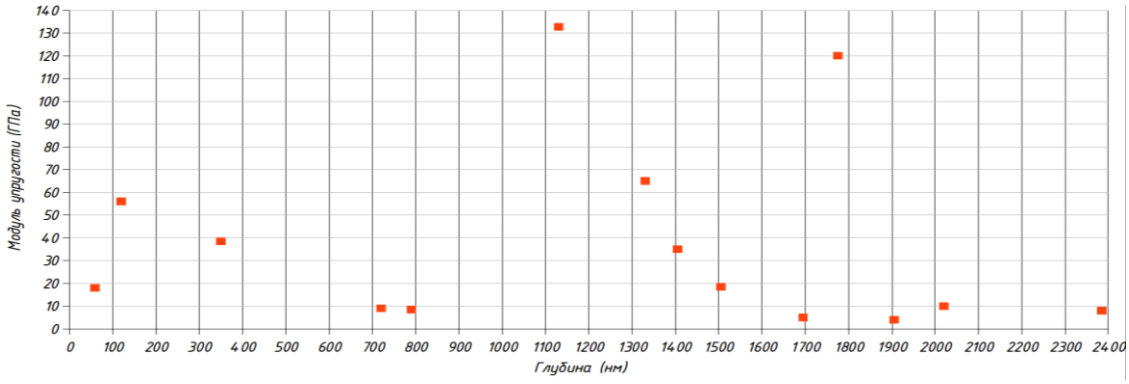


а)

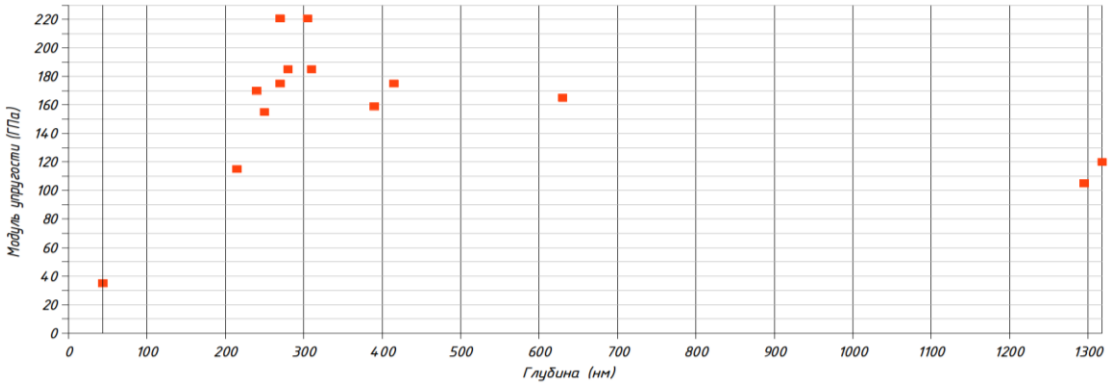


б)

Рисунок 5.17 – Распределение твердости по глубине поверхностного слоя образца из твердого сплава при максимальной нагрузке 12000мкН: а) без дискретного оксидного слоя и б) с дискретным оксидным слоем

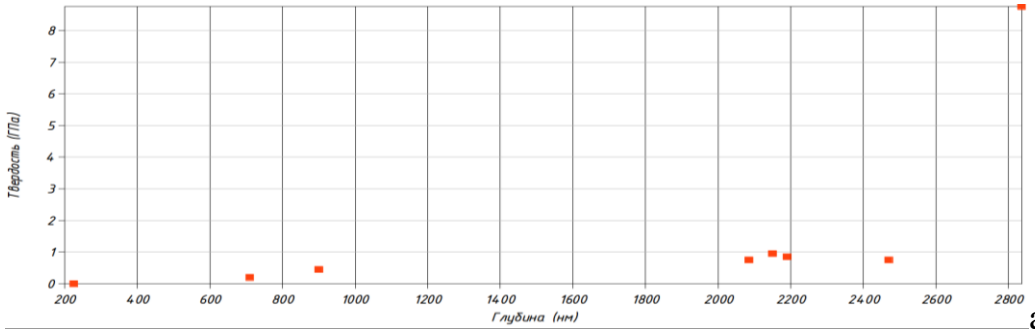


а)

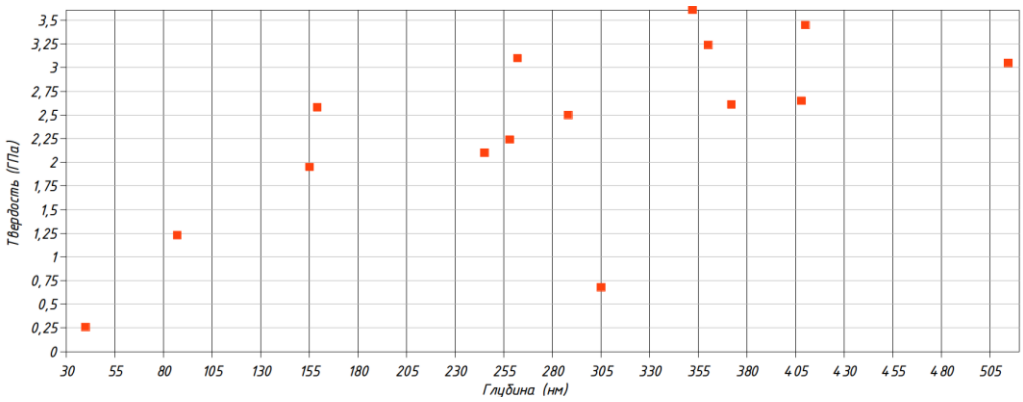


б)

Рисунок 5.18 – Модуль упругости твердого сплава при максимальной нагрузке 12000мкН: а) без дискретного оксидного слоя и б) с дискретным оксидным слоем

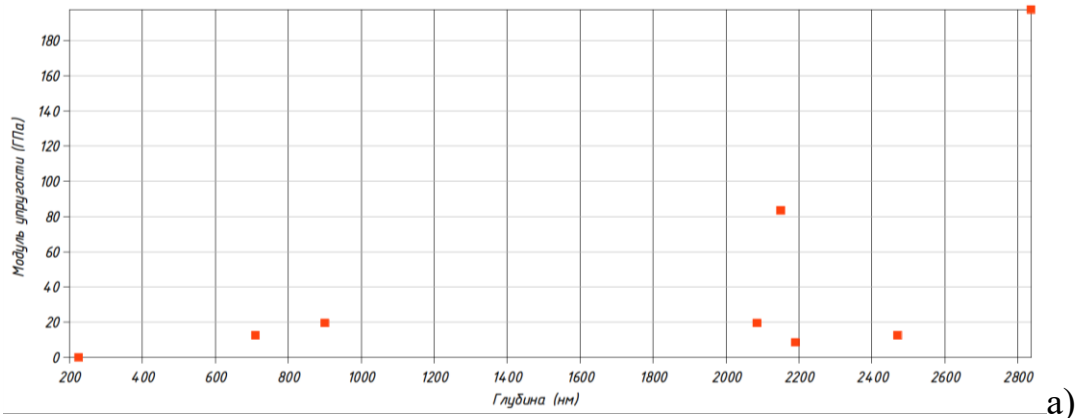


а)

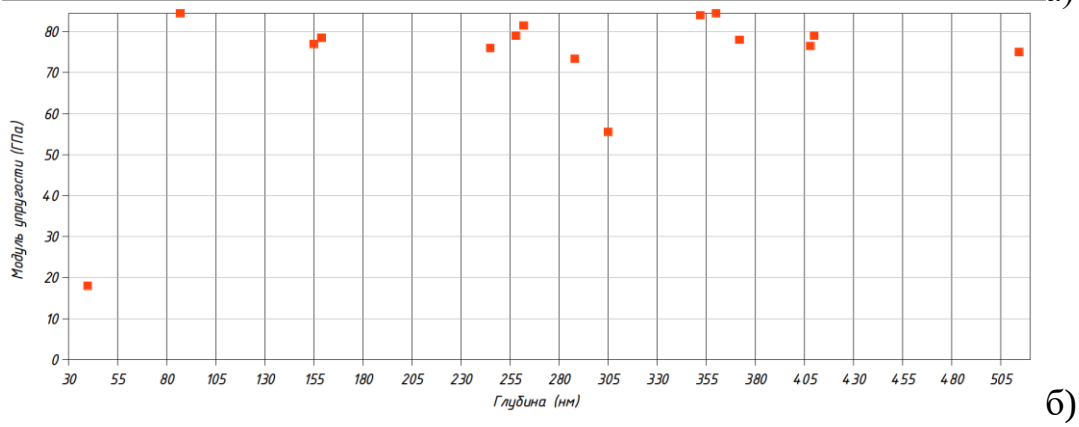


б)

Рисунок 5.19 – Распределение твердости по глубине поверхностного слоя образца из титанового сплава при максимальной нагрузке 12000мкН: а) без дискретного оксидного слоя и б) с дискретным оксидным слоем



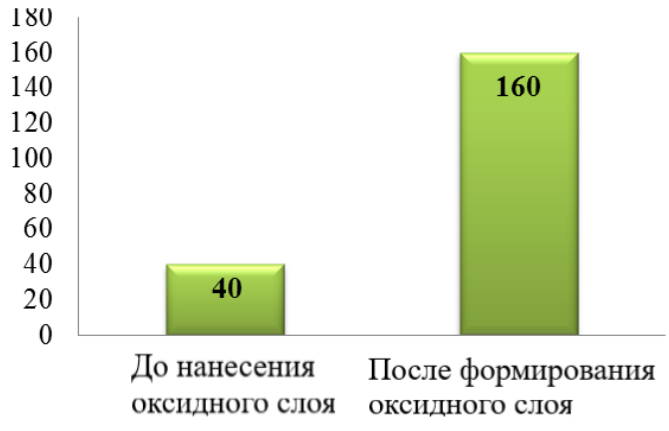
а)



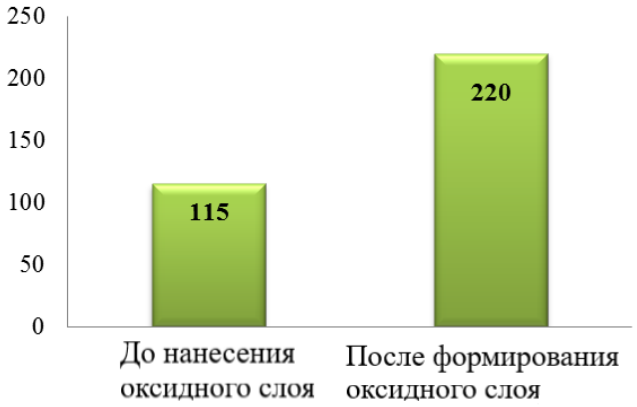
б)

Рисунок 5.20 – Модуль упругости титанового сплава при максимальной нагрузке 12000мкН: а) без дискретного оксидного слоя и б) с дискретным оксидным слоем

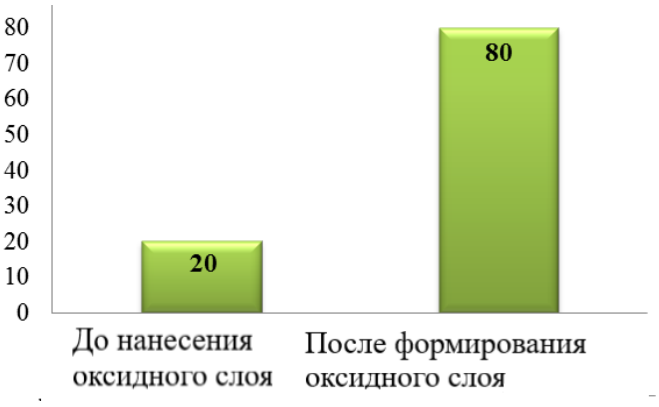
Поскольку структура покрытия играет большую роль в снижении остаточных напряжений, (см. главу 2) то, долговечность покрытия будет повышаться в том случае, если модуль упругости будет увеличиваться, а не уменьшаться. В результате исследований был получен высокий модуль упругости, следовательно, улучшаются пластические свойства, способствующие релаксации напряжений, (см. рисунки 5.14 – 5.21).



а)



б)



в)

Рисунок 5.21 – Влияние модуля упругости на долговечность: а) быстрорежущая сталь Р6М5К5; б) твердый сплав ВК10ХОМ; в) титановый сплав ВТ3–1

Разрушение детали, особенно при переменных нагрузках, в большей степени объясняется концентрацией напряжений, вследствие наличия неровностей. Чем меньше шероховатость, тем меньше возможность возникновения поверхностных трещин, (см. рисунки 5.22 – 5.24), поскольку ячеистая структура препятствует поверхностному распространению трещин в покрытии (см. главу 2).

Согласно ГОСТу 2789-73 шероховатость поверхности - это совокупность неровностей, образующих рельеф поверхности в пределах определенного ее участка, то она характеризуется средним арифметическим отклонением профиля от среднего значения R_a и высотой неровностей R_z.

Высотные параметры: R_a- среднее арифметическое отклонение профиля;

$$R_a = \frac{1}{l}\int_l^0 \left[y_i\right] dx \quad \text{или} \quad R_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i .$$

R_z- высота неровностей профиля по десяти точкам;

$$R_z = \left(\sum_{i=5}^{N} H_{i\,max} + \sum_{i=5}^{N} H_{i\,min} \right) / 5$$

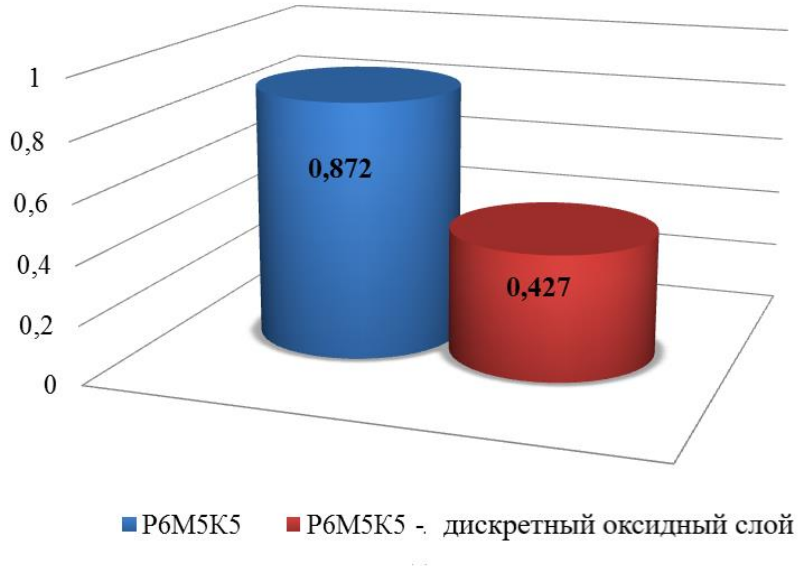


Рисунок 5.22 – Шероховатость быстрорежущей стали Р6М5К5

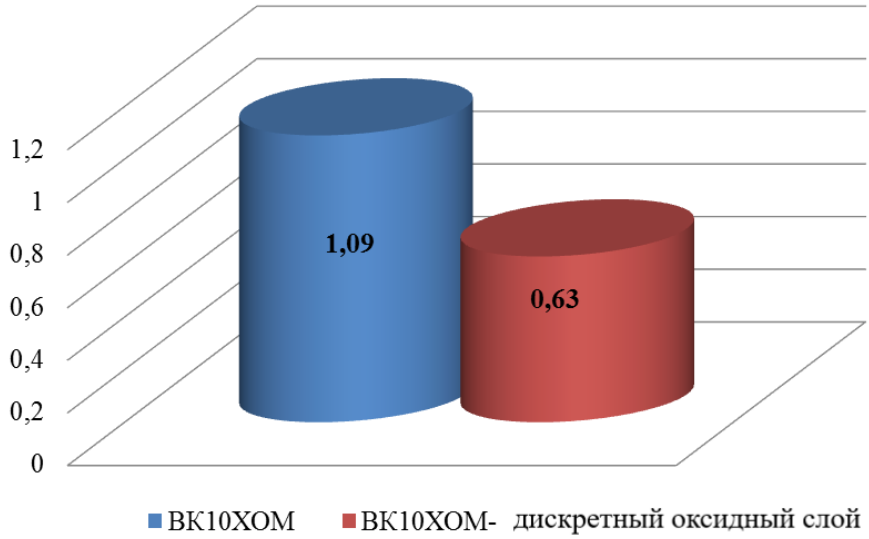


Рисунок 5.23 – Шероховатость твердого сплава ВК10ХОМ

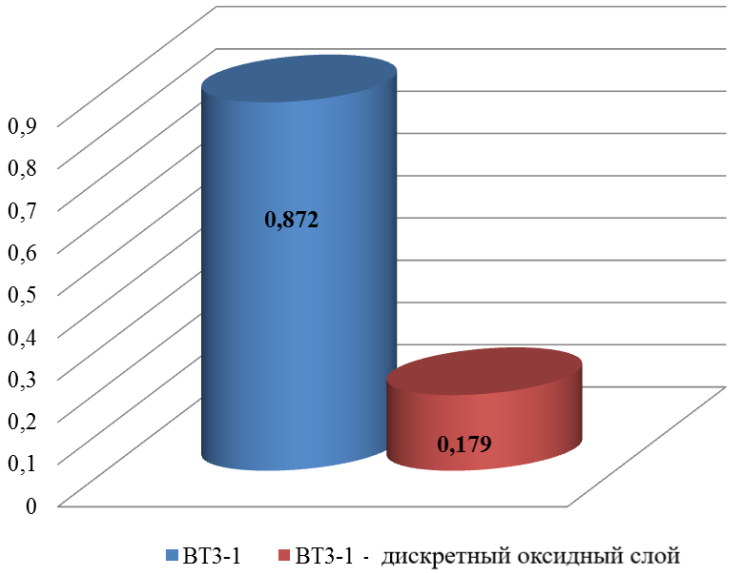


Рисунок 5.24 – Шероховатость титанового сплава ВТ3–1

Проведённые исследования по влиянию параметров процесса нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя по разработанной схеме показали увеличение долговечности, надежности инструмента и качества обработанной поверхности.

Модуль упругости локального диффузионного дискретного оксидного слоя является важнейшим параметром, влияющими на долговечность инструмента. Таким образом, диффузионный дискретный оксидный слой с одной стороны, благоприятно сказывается на повышение долговечности основы за счет роста твердости, с другой стороны - повышает прочность, уменьшая развития квазихрупкости в начальной стадии микротрещины.

Влияние параметров таких как: ток коронного разряда и давления сжатого воздуха позволили корректировать процесс нанесения локального диффузионного дискретного оксидного слоя, равномерно распределяя напряжение между отдельными зернами. Отмечаются также диффузионная миграция ионов и заполнение пустот ионами активированного сжатого воздуха, причем интенсивность разрушения определяется энергией положительных ионов, временем воздействия, углом атаки по отношению к бомбардируемой поверхности и ее фактическим состояниям.

Выводы по главе:

1. Получены физико-механические характеристики быстрорежущего и твердосплавного инструмента после нанесения локального диффузионного дискретного оксидного слоя:

а) твердость для:

- быстрорежущей стали Р6М5, Р6М5К5 с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем в 1,3- 3 раза больше относительно контрольного образца;

- твердого сплава ВК10ХОМ с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем в 2,2 раза больше относительно контрольного образца.

б) модуль упругости для:

- быстрорежущей стали Р6М5, Р6М5К5 с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем в 1,6 - 3,5 раза больше относительно контрольного образца;

- твердого сплава ВК10ХОМ с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем в 1,9 раза больше относительно контрольного образца.

ГЛАВА 6. КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ ИЗНАШИВАНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ДИФФУЗИОННЫМ ДИСКРЕТНЫМ ОКСИДНЫМ СЛОЕМ

6.1 Исследование режущих свойств инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем

Режущие свойства инструмента в значительной степени определяются условиями эксплуатации и, в частности, такими параметрами, как время наработки на отказ (время резания). С учетом достаточно сильных вариационных разбросов времени резания критериями оценки режущих свойств инструмента с локальным дискретным оксидным слоем служили среднее значение времени резания (стойкость) $\overline{T}$ и коэффициент его вариации ν_T.

6.1.1 Методика исследований

Исследование режущих свойств инструмента с локальным дискретным оксидным слоем проводили при продольном точении конструкционных сталей 45 и 40Х и фрезерование титанового сплава ВТ6.

Объектами исследований служили резцы с механическим креплением четырехгранных быстрорежущих и твердосплавных пластин, (см. главу 3), а также концевые фрезы из твердого сплава ВК10ХОМ производства АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», (см. главу 3).

В работе проведены исследования режущих свойств инструмента, как из быстрорежущей стали, так и твердого сплава с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем, со сплошным покрытием и без покрытия. При проведении экспериментов использовали следующую методику.

Кинетику развития очагов изнашивания контактных площадок инструмента изучали путем визуального наблюдения и фотографирования на измерительном устройстве, состоящим из двух микроскопов МБС–9*, (см. рисунок 5.1) .

---

*Приспособление конструкции И. В. Бубнова.

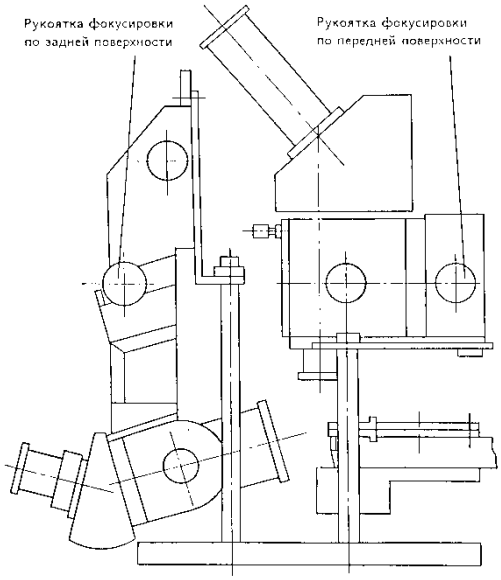


Рисунок 6.1 – Измерительное приспособление МБС–9

Оба микроскопа закрепляли на приспособление таким образом, что их оптические оси образовывали нормали с передней и задней поверхностями исследуемой пластины, устанавливаемой в державке на поворотном столике.

Оснащение микроскопов окулярами со шкалой (цена деления 25мкм) позволило определять размеры исследуемых объектов. Приспособление позволяло не только наблюдать за развитием очагов изнашивания, но фотографировать их с увеличением до 100 с помощью фотокамеры «Ocympus IS–100», устанавливаемой на окуляры. Для оценки размеров наблюдаемых объектов окуляры микроскопов были оснащены сеткой или шкалой с ценой деления 25 мкм.

Кроме того, контактные участки изучали и фотографировали на металлографическом (МИМ–6) и электронносканирующем (РЭММА 202М) микроскопах, что позволяло оценивать состояние режущей кромки инструмента.

Большое внимание уделяли статистической обработке результатов исследования режущих свойств инструмента из быстрорежущей стали и твердосплавным пластинам с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем.

Оценку аппроксимаций регрессионных линий проводили по методу наименьших квадратов по условию:

$$\sum_{i=1}^{n}\left(У_i - Y_i\right) \rightarrow \min$$

где $У_i$ – экспериментальное значение величины; Y_i – теоретическое значение исследуемого параметра.

С учетом монотонного характера зависимости $\overline{T}$=f(v) (точение, фрезерование быстрорежущим и твердосплавным инструментом при варьировании скорости резания в пределах V = 5 – 190 м/мин), функцию $\overline{T}$=f(v) аппроксимировали прямой в двойной логарифмической шкале вида:

$$У = \overline{У} + K(X - \overline{X})$$

где $\overline{Y}$ = K (X - lgC_v)*i*; C_v – постоянная; x, y – координаты заданной точки.

Математическая обработка данных экспериментальных исследований включала оценку средних значений, $\overline{X}$, $\overline{Y}$.

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} У_i \; ; \qquad \bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1Б}^{n} X_i$$

где n – число дублей испытаний (обычно n = 10 – 15);

$$K = \frac{\sum x — - \sum x \cdot \sum y/n}{\sum x^2 - (\sum x)^2/n}$$

$$\lg C_v = \bar{X} - \frac{\bar{У}}{K}$$

Доверительность интервала среднего значения времени резания до отказа режущего инструмента $\overline{T}$ и коэффициента его вариации $\nu_т$ оценивали по методике, представленной в главе 3.

6.2 Исследование параметров процесса резания и режущих свойств инструмента с дискретным диффузионным дискретным оксидным слоем

Для установления особенностей процесса резания и изнашивания инструмента из быстрорежущей стали и твердого сплава с локальным

дискретным оксидным слоем в сравнении с соответствующими параметрами контрольного инструмента были проведены широкие исследования процесса точения и фрезерования, результаты которых излагаются в настоящем разделе.

6.2.1 Исследования параметров резания и режущих свойств инструмента при продольном точении

Работоспособное состояние инструмента определяется многими факторами. Но, прежде всего в значительной степени зависит от сопротивляемости контактных площадок инструмента изнашиванию и разрушению при взаимодействии с обрабатываемым материалом. Изнашивание контактных площадок обусловлено несколькими одновременно действующими механизмами – абразивным, адгезионно-усталостным, химико-окислительным и диффузионным. В зависимости от условий резания и характера контактного взаимодействия (непрерывный, прерывистый, нестационарный) один из действующих механизмов изнашивания может стать превалирующим и может определять долговечность инструмента [80, 81, 82, 83, 84]

Исследования кинетики и механизмов изнашивания инструмента с различными вариантами покрытий проводили для различных условий резания − непрерывном (продольное и поперечное точение) и прерывистом (торцовое фрезерование). Исследование режущих свойств инструмента с быстрорежущими и твердосплавными пластинами с локальным диффузионным покрытием были проведены на ОАО «МПО им. И. Румянцева».

Обобщенные кривые $\bar{h}_з = f(\tau)$ и характер изнашивания инструмента с быстрорежущими и твердосплавными пластинами с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем представлены на рисунках 6.2 – 6.11.

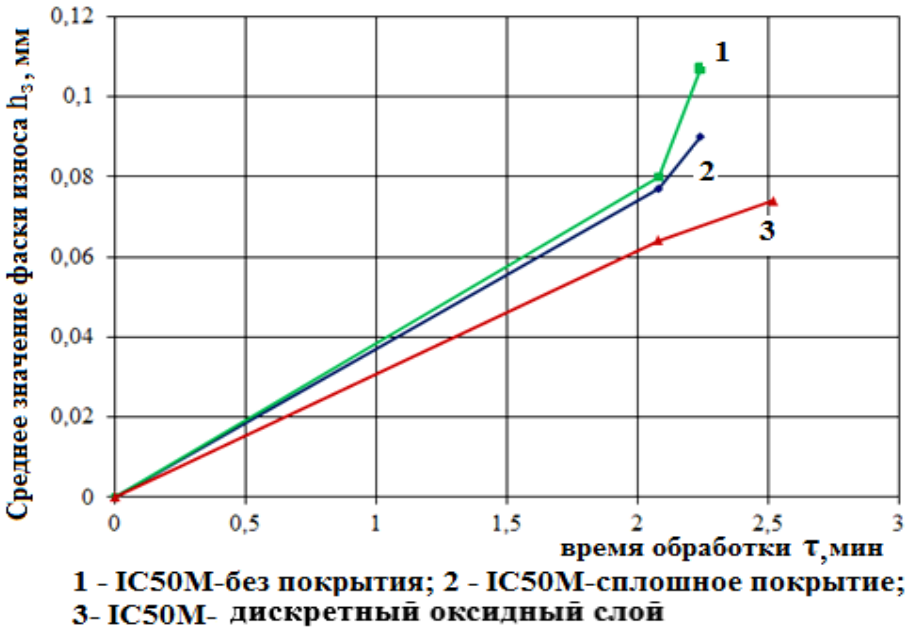
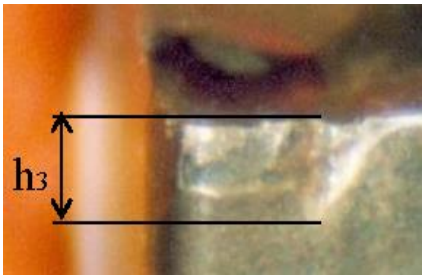
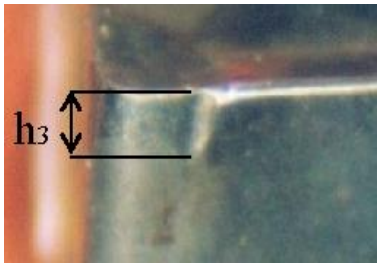


Рисунок 6.2 – Обобщенные кривые $\bar{h}_з$=f(τ), полученные при поперечном точении стали 40Х (НВ220) резцом с твёрдосплавной пластиной IC50M: v = 190 м/мин;s = 0,4 мм/об; t = 2мм

На рисунке 6.3 показан очаг изнашивания режущего инструмента, как с диффузионным дискретным оксидным слоем, так и без покрытия.



а)



б)

Рисунок 6.3 – Характер изнашивания контактной площадки задней поверхности твердосплавной пластины резца (IC50M) при точении стали 40Х (v = 190 м/мин; t = 2мм; s = 0,4мм/об.): а – без покрытия; б – с диффузионным дискретным оксидным слоем

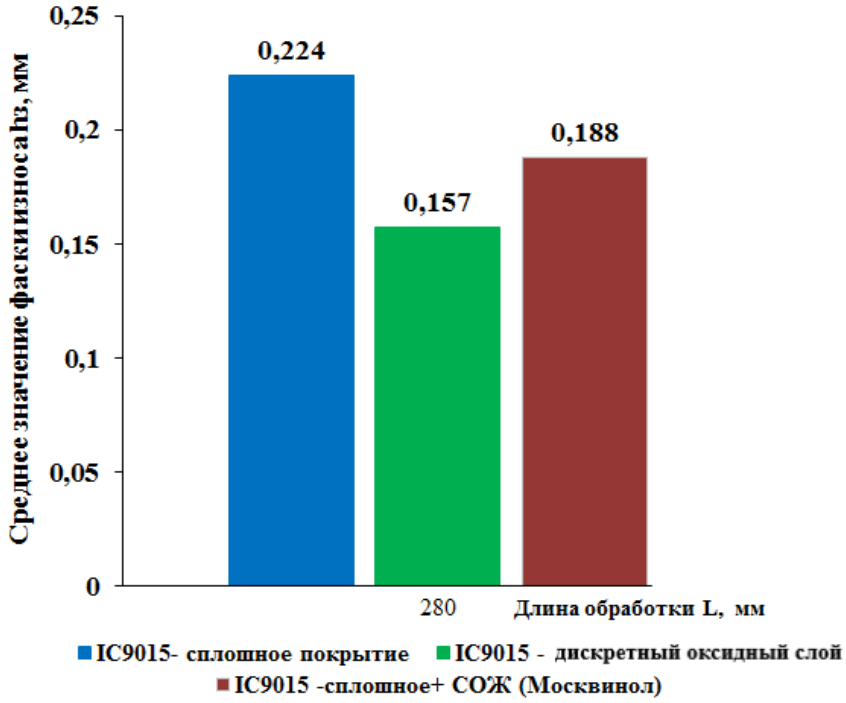
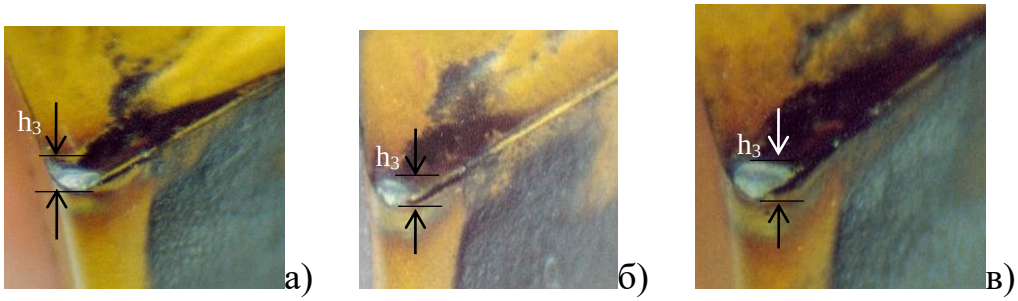


Рисунок 6.4 – Зависимость износа твердосплавных пластин IC9015 от длины обработки при продольном точении стали 40Х (НВ220): v = 225 м/мин; s= 0,2 мм/об; t = 1мм

На рисунке 6.5 показан очаг изнашивания режущего инструмента, как с диффузионным дискретным оксидным слоем, так и со сплошным покрытием.



а) б) в)

Рисунок 6.5 – Характер изнашивания контактной площадки задней поверхности твердосплавной пластины режущего инструмента (IC9015) при точении стали 40Х (v = 225 м/мин; s= 0,2 мм/об; t = 1мм): а – сплошное покрытие; б – диффузионный дискретный оксидный слой; в – сплошное покрытие с применение СОЖ (Москвинол)

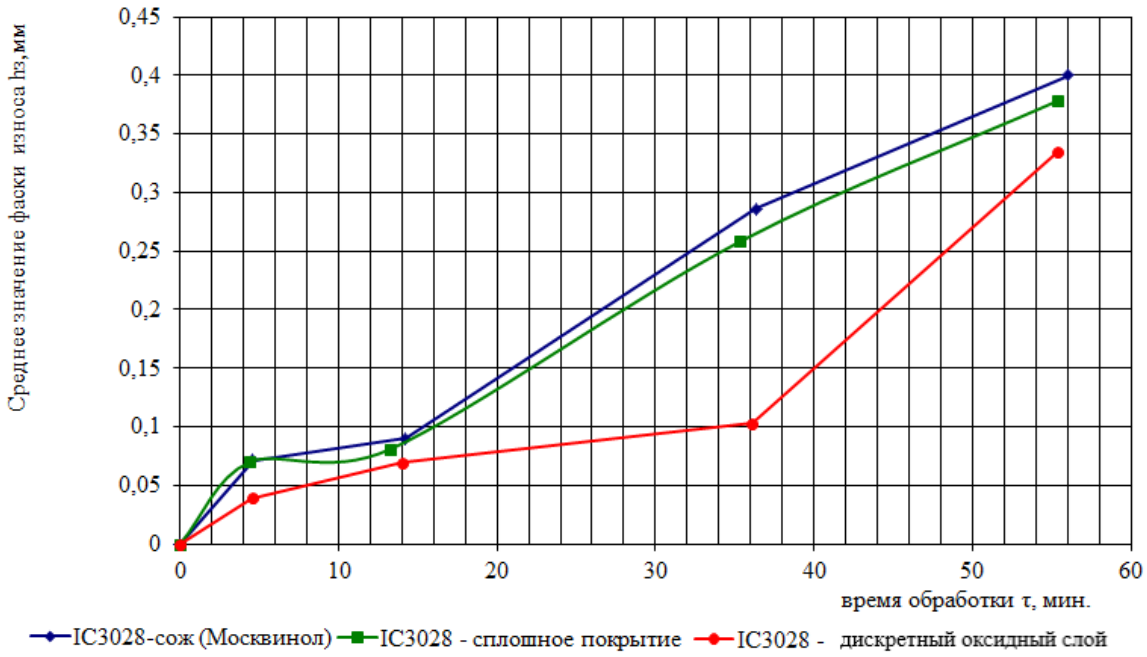
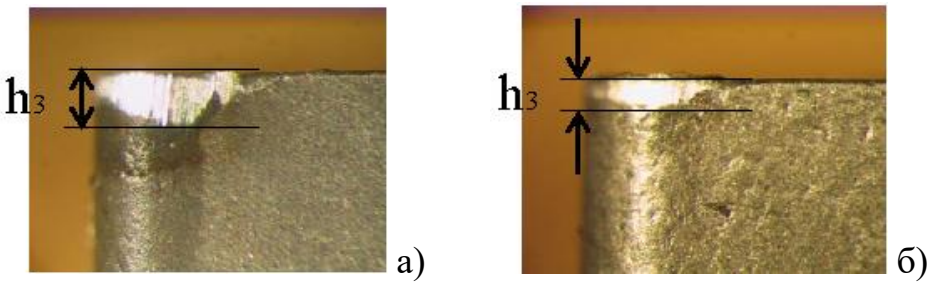


Рисунок 6.6 – Обобщенные кривые $\bar{h}_3 = f(\tau)$ полученные при продольном точении стали 40Х (НВ220) твердосплавными пластинами IC3028: v =150м/мин; s=0,2мм/об; t=1мм

На рисунке 6.7 показан очаг изнашивания режущего инструмента, как с диффузионным дискретным оксидным слоем, так и без покрытия.



а) б)

Рисунок 6.7 – Характер изнашивания контактной площадки задней поверхности твердосплавной пластины режущего инструмента (IC3028) при точении стали 40Х (v = 150 м/мин; s= 0,2 мм/об; t = 1мм): а – сплошное покрытие; б – диффузионный дискретный оксидный слой

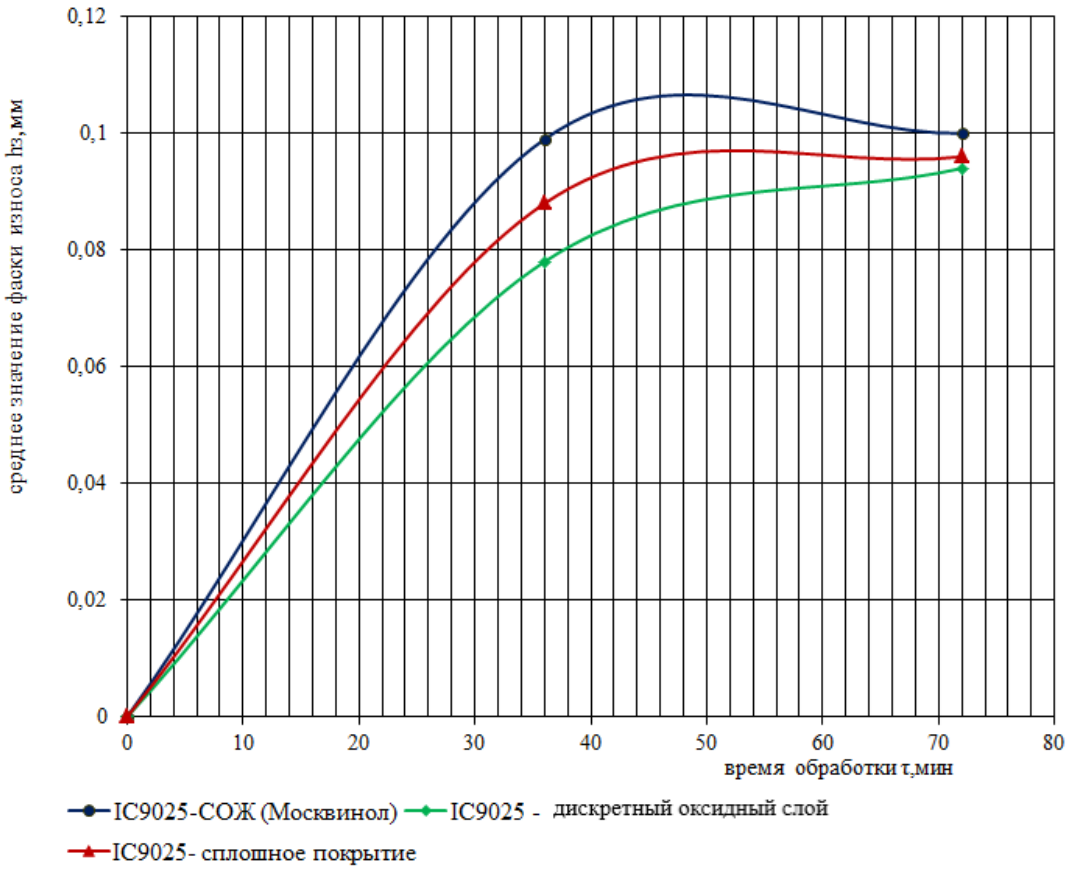


Рисунок 6.8 – Обобщенные кривые $\bar{h}_з$=f(τ), полученные при продольном точении стали 40Х (НВ220) твердосплавными пластинами IC9025: v=190м/мин; s=0,4мм/об; t=2мм

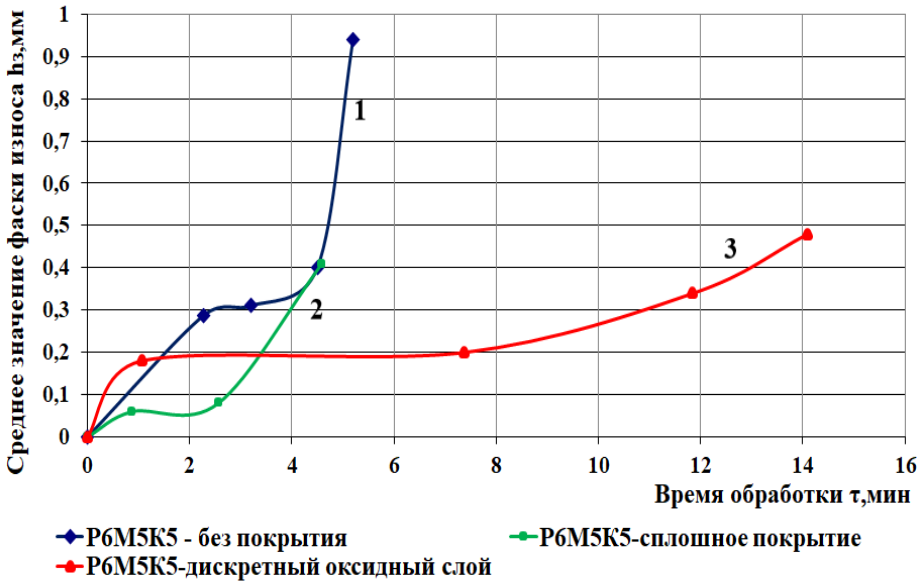


Рисунок 6.9 – Обобщенные кривые $\bar{h}_з$=f(τ), полученные при продольном точении стали 40Х (НВ220) с v = 80 м/мин; s = 0,175 мм/об; t=1,0 мм резцом с быстрорежущей пластиной Р6М5К5

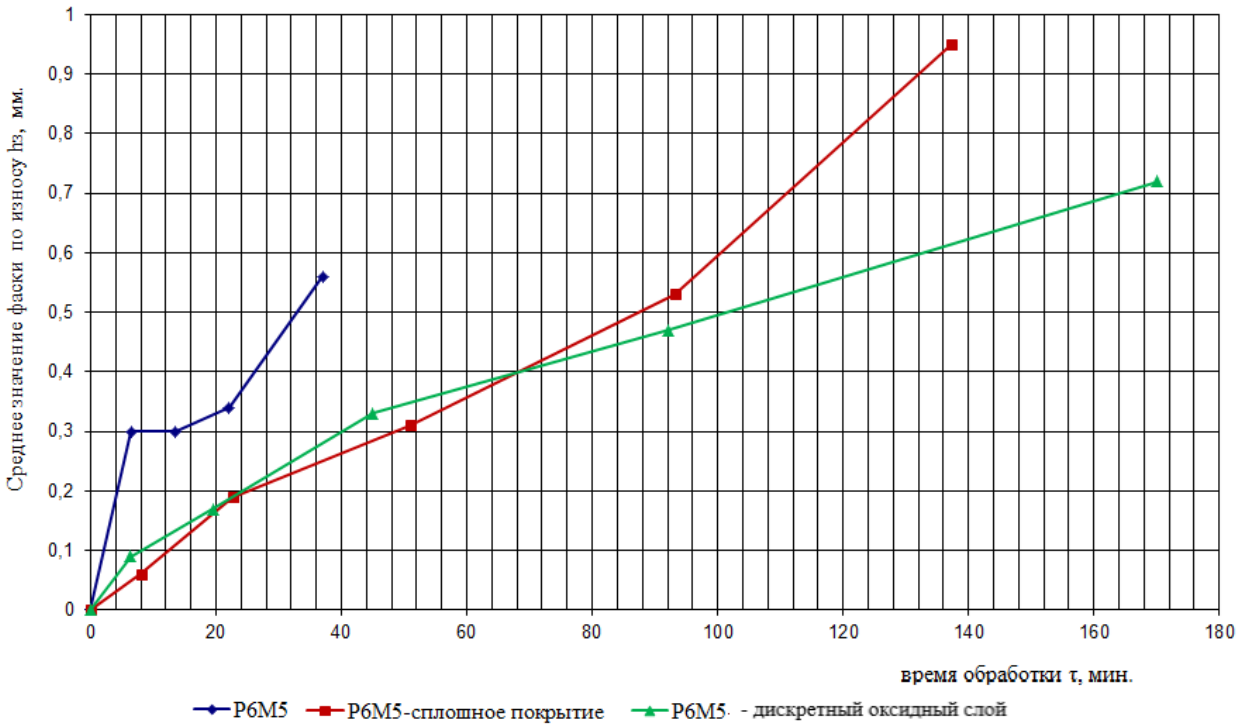
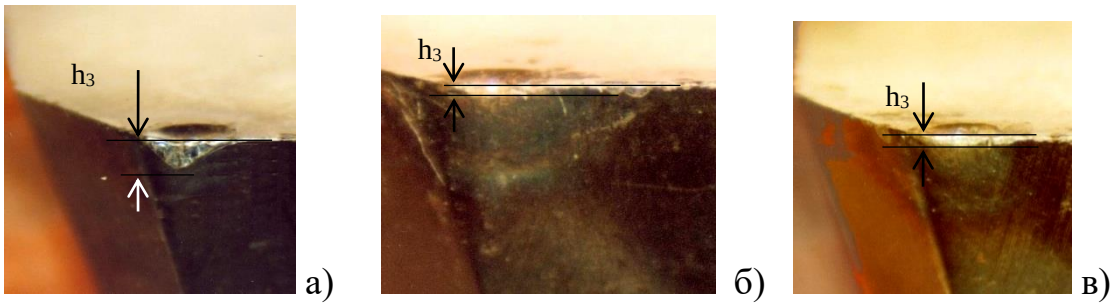


Рисунок 6.10 – Обобщенные кривые $\bar{h}_з = f(\tau)$, полученные при продольном точении стали 40Х (НВ220) с v = 65 м/мин; s = 0,175 мм/об; t=1,0 мм резцом с быстрорежущей пластиной Р6М5



а) б) в)

Рисунок 6.11 – Характер изнашивания контактной площадки задней поверхности быстрорежущей пластины (Р6М5) при точении стали 40Х (v = 65 м/мин; s = 0,175 мм/об; t=1,0 мм): а – без покрытия; б – дискретный оксидный слой; в – сплошное покрытие

Установлено, что режущий инструмент с дискретным оксидным слоем, показал износостойкость выше, по отношению к инструменту без покрытия и инструменту со сплошным покрытием, о чем свидетельствуют графики и характер изнашивания контактной площадки задней поверхности режущей кромки инструмента.

Сравнение кривых $\bar{h}_з$ =f(τ), (см. рисунки 6.3 – 6.8) позволяют отметить, что на стадии приработочного изнашивания, диффузионный дискретный оксидный слой снижает термомеханические нагрузки на контактной площадке инструмента, эффективно тормозит изнашивание по задней поверхности режущего инструмента.

Были проведены исследования на разных режимах обработки разными инструментальными материалами, а также с применением смазочно-охлаждающей жидкостью.

Установлено, что режущий инструмент с диффузионным дискретным оксидным слоем, повышает износостойкость резцов с твердосплавными пластинами IC50M при поперечном точении, стали 40Х (НВ220) в 3-4 раза по сравнению с пластинами без покрытия и в 1,8-2,5 раза по сравнению со сплошным покрытием; а износостойкость резцов с твердосплавными пластинами IC3028, IC9015 и IC9025 при продольном точении стали 40Х (НВ220) в 1,5 раза по сравнению с пластинами со сплошным покрытием с использованием смазочно-охлаждающей жидкостью и в 1,8 - 2 раза по сравнению с пластинами со сплошным покрытием без смазочно-охлаждающей жидкости.

Установлено, что режущий инструмент с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем, (см. рисунки 6.9 – 6.10) повышает износостойкость резцов с быстрорежущими пластинами Р6М5, Р6М5К5 при продольном точении стали 40Х (НВ220) в 4-5 раз по сравнению с пластинами без покрытия и в 1,5-3 раз по сравнению со сплошным покрытием.

Дискретный оксидный слой позволяет повысить долговечность и износостойкость инструмента. В процессе механообработки при повышенной температуре оксиды переходят в более стабильное состояние, заполняя вакансии в решетке [59, 85, 86]. Происходит процесс восстановления основы после окисления. Повышенное содержание кислорода в поверхностном слое в форме твердого раствора внедрения сопровождается увеличением удельного объема, формированием остаточных сжимающих напряжений.

Таким образом, можно отметить, что атомы и ионы активированного

воздуха под действием коронного разряда осаждаются на поверхностности инструментального материала и изменяют кристаллическую решетку (измельчение структуры, увеличение плотности кристаллического строения, текстурированию тонких приповерхностных слоев) [57, 67, 86].

Отмеченная выше минимальная интенсивность изнашивания при точении стали 40Х, связано с двумя факторами:

1. Исходная структура быстрорежущих и твердосплавных пластин с дискретным оксидным слоем обладает повышенной сопротивляемостью изнашиванию вследствие упрочнения поверхности.

2. Энергетическое воздействие процесса резания на контактной площадке инструмента с дискретным оксидным слоем существенно ниже соответствующего воздействия на контактные площадки инструмента без покрытия.

3. Поэтому для режущего инструмента с дискретным оксидным слоем снижается уровень термомеханического воздействия на режущий инструмент. Это приводит к своеобразному дополнительному упрочнению структуры инструментального материала.

Для подтверждения положения о снижении термомеханического воздействия на режущую кромку инструмента произведена оценка уровня энергозатрат и экспериментальная оценка теплового состояния режущего клина инструмента.

Для теоретической оценки изменения относительной температуры на поверхности контакта для инструмента с ячеистым покрытием использовали формулу А.Н. Резникова [87]:

$$Q = 1 - \frac{h_I \lambda_{им} \sqrt{\tau}}{20 \lambda_I \sqrt{\varpi_{им} \cdot \tau}} \qquad (6.1)$$

где h_I, λ_I - толщина и коэффициент теплопроводности соответственно режущего инструмента с оксидным слоем; $\varpi_{им}$ - теплофизическая характеристика инструментального материала; τ - время резания; $\lambda_{им}$ - коэффициент теплопроводности инструментального материала.

Расчеты производили при τ = const = 10с, т.е. при времени резания, соответствующего приработанному периоду стойкости режущего инструмента. Данные расчетов параметра Q при значениях параметров, входящих в формулу (6.1), взятых из источников [87, 88, 89, 90, 91], приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Значения исходных данных для расчетов изменения относительной температуры в режущем инструменте при τ = 10с

Режущий инструмент	λ_I, Вт/м°С	$\varpi_{им}$ Вт/м^2 °С	Q
Р6М5 – без покрытия	42,3	29,6	0,65
Р6М5 – дискретный оксидный слой	28,4	37,2	0,54
ІС50М – без покрытия	32,1	36,5	0,57
ІС50М – дискретный оксидный слой	27,1	39,4	0,48

Анализ данных таблицы 6.1 позволяет отменить сильное влияние характеристик упрочняющих слоев на изменение относительной температуры Q, поступающей в режущую часть инструмента. Так основной вклад в снижение скорости роста температуры в режущую кромку инструмента вносит диффузионный нано-слой, (см. таблицу 6.1).

Расчеты параметра Q по формуле (6.1) весьма приблизительны т.к. не учитывают изменение мощности тепловых источников от трения по контактным площадкам передней и задней поверхностей. Не учитывает зависимость и дифференциальный характер параметра λ_I - для нано-слоев. Тем не менее, в первом приближении данных расчетов, представленных в таблице 6.1, можно констатировать факт заметного снижения скорости нагрева режущего инструмента с локальным диффузионным покрытием, за период приработочного изнашивания. Анализ формулы (6.1) и данных таблицы 6.1 позволяет также отметить, что «чистый» теплоизолирующий эффект локальных (ячеистых) диффузионных покрытий тем выше, чем меньше соотношение $\lambda_{им}/\lambda_I$, неравномерность толщины упрочняющего слоя h_I и меньшее время τ.

Для оценки температуры на длине контакта стружки с передней поверхностью использовали теоретические зависимости, представленные в работе [88].

Исходя из очевидного положения о равенстве температуры режущего инструмента и стружки на границах контакта стружки и передней поверхности инструмента приравнивали $T_{ри}(o)$ и $T_{ом}(o, \tau)$. С учетом того, что

$$T_{ом}(o,\tau) = \frac{\alpha \cdot q}{2\lambda_{ом}} \sqrt{6 \cdot a_{ом} \cdot \tau} \text{ , а} \qquad (6.2)$$

$$T_{ом}(o) = \frac{1-\alpha}{\lambda_{им} \cdot m_{им}} \text{ , получим: } \frac{1-\alpha}{\lambda_{ом} m_{ом}} = \frac{\alpha}{2\lambda_{ом}} \sqrt{6 \cdot a_{ом} \cdot \tau}$$

После преобразований получим:

$$2\lambda_{ом} - 2\lambda_{ом}\alpha = \alpha\lambda_{им} m_{им} \sqrt{6 \cdot a_{ом} \cdot \tau};$$

$$2\lambda_{ом} = \alpha(2\lambda_{ом} + \lambda_{им}\, m_{им} \sqrt{6 \cdot a_{ом} \cdot \tau})$$

Откуда коэффициент распределения температуры α равен:

$$\alpha = \frac{2\lambda_{ом}}{2\lambda_{ом} + \lambda_{им} \cdot m_{им} \cdot \sqrt{6 \cdot a_{ом} \cdot \tau}} \qquad (6.3)$$

Если подставить выражение (6.3) в (6.2), то можно получить зависимость для оценки температуры контакта стружки и передней поверхности:

$$T_{п} = \frac{\alpha \cdot q \cdot \sqrt{6 \cdot a_{ом} \cdot \tau}}{2\lambda_{ом}} = \frac{q \cdot \sqrt{6 \cdot a_{ом} \cdot \tau}}{2\lambda_{ом} + \lambda_{им} \cdot m_{им} \cdot \sqrt{6 a_{ом} \cdot \tau}} = \frac{\sqrt{1{,}5 \cdot q} \cdot \sqrt{q_{ом} \cdot \tau}}{\lambda_{ом} \cdot \lambda_{им} m_{им} \sqrt{1{,}5} \cdot \sqrt{a_{ом} \cdot \tau}}$$

с учетом того, что $q = \tau V_c$, $\tau = l_k / V_c$ получим

$$T_{п} = \frac{\tau_S V_C \sqrt{1{,}5 \cdot a_{ом} l_K}}{\lambda_{ом} \sqrt{V_C + \lambda_{ом} \cdot m_{ом} \sqrt{1{,}5 \cdot q_2\, l_K}}} \qquad (6.4)$$

Применительно к условиям контактирования обрабатываемого материала и инструментального материала по передней поверхности общая длина контакта согласно данным [87, 88, 89] определится по формуле:

$$l_\gamma = 2S \cdot \sin\varphi \left[K_l \cdot (1 + tg\gamma g + \sec\gamma \right] \qquad (6.5)$$

Подставляя (6.4) в выражение (6.5) окончательно получим выражение для оценки среднего значения температуры контакта по передней поверхности с учетом того, что $V_c = V / K_l$

$$T_{п}=\frac{\sqrt{1,5\tau_S}\cdot V/K_l\sqrt{2a_{ОМ}\cdot S\cdot\sin\varphi\left[K_l(1+tg\varphi)+\sec\varphi\right]}}{\sqrt{V/K_l\cdot\lambda_{ОМ}}+\sqrt{1,5\lambda_{ИМ}}\cdot m_{ИМ}\sqrt{2a_{ОМ}\cdot S\cdot\sin\varphi\left[K_l(1+tg\varphi)+\sec\gamma\right]}} \quad (6.6)$$

В формулах (6.2) - (6.6) значения элементов в них входящих расшифровываются следующим образом: α - коэффициент распределения теплового потока; $\lambda_{ом}$, $\lambda_{им}$ - коэффициенты теплопроводности обрабатываемого и инструментального материалов; V - скорость резания; K_l - коэффициент продольной деформации стружки; S - подача; $\tau = 0{,}52 - \sigma_в$ [88] - касательные напряжения; q, τ, U - мощность теплообразования; коэффициент $m_{им}$ согласно работе [90] равен: $m_{им}=\sqrt{\frac{\alpha_{им}\cdot\sigma_{им}}{\lambda_{им}\cdot F_{им}}}=\frac{\sigma_{им}}{F_{им}}\sqrt{B_{i_i}}$, где $\alpha_{им}$ - коэффициент теплопередачи; $F_{им}$ - площадь сечения режущего инструмента; B_i - критерий Био для стали Р6М5 $m_{им}=32м^{-1}$.

Расчеты проводили для варианта точения стали 40Х ($\sigma_В$ = 730МПа) резцами, оснащенными пластинами Р6М5 с оксидным слоем (см. рисунок 6.8), имеющих $\varphi=45^0, \gamma=8^0$; v = 65 м/мин; t = 1мм; s = 0,175 мм/об.

Таким образом, дискретный оксидный слой повышает долговечность режущего инструмента, за счет релаксации напряжений.

6.2.2 Исследование параметров резания и свойств инструмента при фрезеровании

Фрезерование – один из сложных видов механообработки, характеризующийся многообразием видов и схем обработки с переменными в каждый момент резания параметрами срезаемого слоя. Фрезерование является одной из самых теплонапряженных операций механической обработки, что связано с чрезвычайно неблагоприятным распределением передних и задних углов.

Фрезерование является одной из самых термомеханических напряженных операций резания, поэтому были проведены исследования режущих свойств твердосплавных фрез ВК10ХОМ при фрезеровании титана ВТ6 (НВ 340).

Фрезерование приводит к чрезвычайно высокому уровню пластических деформаций и трения, что, в свою очередь, является причиной значительного роста термомеханических напряжений при фрезеровании. Кроме того, при фрезеровании заметно увеличивается теплопоток в инструмент, так как разогретая стружка, перемещаясь по стружечным канавкам фрезы, усиливает теплоотдачу в инструмент, что является причиной снижения скорости резания при фрезеровании на 20 – 40% по сравнению с точением.

С учетом сказанного, для исследований режущих свойств реального инструмента были выбраны твердосплавные фрезы диаметром 10 мм, для которых были проведены исследования в широком диапазоне изменения факторов режима фрезерования титанового сплава ВТ6. Исследование режущих свойств твердосплавных фрез с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем были проведены на АО «НПЦ газотурбостроения «Салют».

Результаты исследований кинетики изнашивания фрез приведены на рисунках 6.12 – 6.14, а характер изнашивания показан на рисунке 6.15.

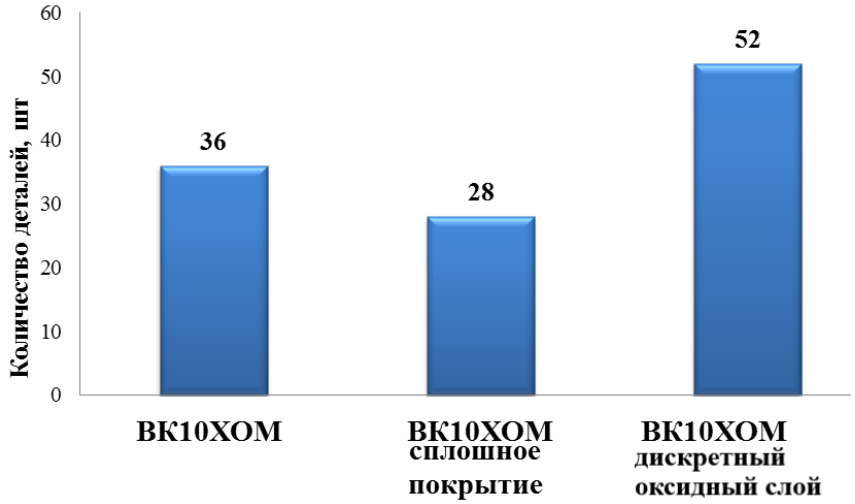


Рисунок 6.12 – Работоспособность твердосплавных фрез ВК10ХОМ при черновом фрезеровании титановых лопаток ВТ6: n = 1020 об/мин, $S_м$ = 490 мм/мин, S_z = 0,08 мм/об

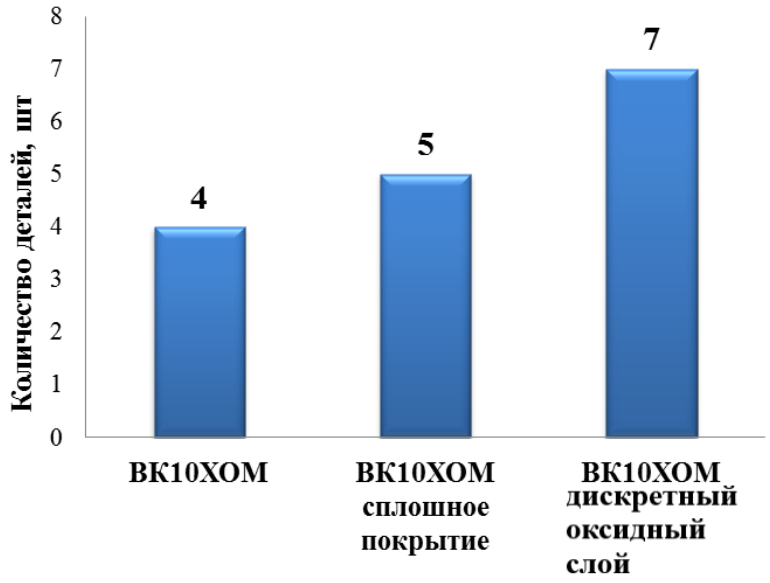
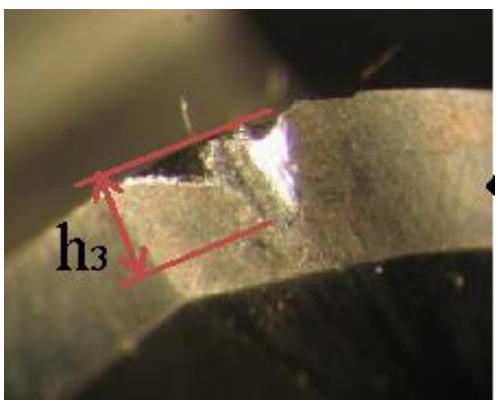
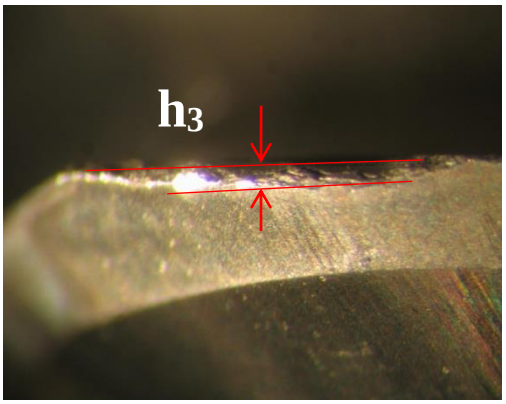


Рисунок 6.13 – Работоспособность твердосплавных фрез ВК10ХОМ при чистовом фрезеровании титановых лопаток ВТ6: n = 2725 об/мин, $S_м$ = 1745 мм/мин, S_z = 0,16 мм/об

Рисунок 6.14 – Работоспособность твердосплавных фрез ВК10ХОМ при черновом фрезеровании титановых лопаток ВТ6 после переточки: n = 1020 об/мин, $S_м$ = 490 мм/мин, S_z = 0,08 м м/об



а)



б)

Рисунок 6.15 – Характер разрушения твердосплавной фрезы при черновом фрезеровании титанового сплава: а – без покрытия; б – с дискретным оксидным слоем

В результате исследований установлено, что при фиксированных значениях износа при черновом фрезеровании износостойкость твердосплавных фрез ВК10ХОМ с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем в 1,8 раза выше, относительно исходных фрез без покрытия, и в 2 раза выше фрез со сплошным покрытием. При чистовом фрезеровании, при фиксированных значениях износа, износостойкость твердосплавных фрез ВК10ХОМ с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем в 1,5 раза выше относительно фрез со сплошным покрытием и в 1,8 раза относительно фрез без покрытия. При переточке износостойкость твердосплавных фрез ВК10ХОМ с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем в 2- 2,5 раза выше относительно фрез без покрытия.

Как видно из представленных гистограмм наибольшей сопротивляемостью изнашиванию обладают фрезы с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем [92]. Однако при этом проявляются те же закономерности, которые были получены при исследованиях режущих свойств пластин. В частности, отмечено сильное снижение интенсивности изнашивания фрез с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем на этапе приработочного изнашивания, достаточно высокая продолжительность времени нормального изнашивания и развитие интенсивного (катастрофического) изнашивания при меньших

значениях критического изнашивания задней поверхности фрезы (или уголка) в пределах $h_з$=0,2-0,3 мм. Таким образом, дискретный оксидный слой может быть использован для циклических операций [92, 93, 94, 95, 96, 97].

6.3 Оценка экономического эффекта и эффективность применения режущего инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем.

При внедрении в производство режущего инструмента с износостойким покрытием увеличивается период стойкости инструмента и, соответственно, производительность, что является основным эффектом от их применения.

Проведем расчет экономической эффективности использования твердосплавных фрез ВК10ХОМ R<1° Z=6 с ионно-плазменным покрытием (ZrAl)N, с диффузионным оксидным слоем MeO-O_2 (WO_3-WO_2-Co_3O_4-CoO) для операции чернового фрезерования детали «лопатка» из титанового сплава ВТ6. Акты прилагаются. Данные представлены с предприятия АО «НПЦГ «Салют»: - общий припуск, который необходимо снять с детали, равен 2100500 мм^3 из которых 5 % отводится на чистовую обработку; - цена фрезы без покрытия 4 450 руб.; - цена переточки фрезы 990 руб. (количество переточек фрезы до замены принимается равным 4); - цена нанесения покрытия 1400 руб.

Техническую себестоимость можно определить по формулам:

- Расчет производительности труда на покрытие:

$N = 60*Ф_р*n_R*K_{рем}$ /W

N – годовая программа выпуска

$Ф_р$ – годовой фонд времени рабочего

n_R – Число смен в сутки; 1 смена 8 час.

$K_{рем}$ – Коэффициент потерь времени на ремонт оборудования

W - Время нанесения покрытия на одну деталь

N = 60*1974*1*0,94/3ч = 37 111 шт WO_3 - WO_2- Co_3O_4 - CoO

N = 60*1974*1*0,94/4ч = 27 833 шт (Zr,Al)N

- Трудоемкость программы выпуска

$Тр_{(баз)} = N_{баз} * W_{баз}$ = 27 833 * 4 = 111332 мин (Zr,Al)N

$Тр_{(пр)} = N_{пр} * W_{пр}$ = 37111 * 3ч = 111333 мин WO_3 - WO_2- Co_3O_4 - CoO

- Количество оборудования

$N_{об(баз)} = Тр_{баз}/(60*Ф_{о(баз)})$ = 204111/(60*4015) = 1 шт (Zr,Al)N

$N_{об(пр)} = Тр_{пр}/(60*Ф_{о(пр)})$ = 111333/(60*4015) = 1 шт WO_3 - WO_2- Co_3O_4 - CoO

- Площадь рабочего места, работающего: S = 20

- Количество работников

$R_{баз} = Тр_{баз} \cdot n_R /(60 \cdot Ф_р \cdot n_R \cdot K_{рем})$ = 204111· 1/(60 ·1974 ·0,94) = 2 чел (Zr,Al)N

$R_{пр} = Тр_{пр} \cdot n_R/(60 \cdot Ф_р \cdot n_R \cdot K_{рем})$ = 111333·1/(60·1974·0,94) = 1 чел WO_3 - WO_2- Co_3O_4 - CoO

- Годовая выработка на одного рабочего

$B_{R(баз)} = N / R_{баз}$ = 27 833 / 2 = 13 916 шт/чел (Zr,Al)N

$B_{R(пр)} = N / R_{пр}$ = 37111 / 1 = 37 111 шт/чел WO_3 - WO_2- Co_3O_4 - CoO

- Повышение производительности труда

$\Delta B = (B_{R(пр)} – B_{R(баз)} / B_{R(баз)}) * 100\% = ((37111 – 13916) / 13916)) *100\%$ = 166%

- Основная заработная плата рабочего за год

$ЗП_{осн(баз)} = ч_{с(баз)} * Ф * n_R * K_{рем} * K_{пр}$ = 264*1974*1*0,94*1,4 = 685 814 руб (Zr,Al)N

$ЗП_{осн(пр)} = Ч_{с(пр)} * Ф_р * n_R * K_{рем} * K_{пр}$ = 132*1974*1*0,94*1,4 = 342 907 руб – WO_3 – WO_2- Co_3O_4 – CoO

- Затраты на электроэнергию за год

Это вид затрат на топливо или электроэнергию, используемых для нагрева обрабатываемых заготовок, деталей в соответствии с требованиями технологического процесса.

$З_{эл}=M_у*F_с*K_с*K_{з.с}*Ц_{эл}$

$M_У$ - потребляемая мощность в кВт

$F_С$ - годовой фонд времени работы единицы оборудования в часах

$K_С$ - коэффициент спроса

$K_{ЗС}$ - коэффициент загрузки оборудования

$Ц_{ЭЛ}$ - стоимость одного кВт-часа

$З_{эл}=30*1974*0,9*0,8*4=170\ 553,00$ руб. (Zr,Al)N

$З_{эл}=23*1974*0,9*0,8*4=130\ 757,76$ руб. WO_3 - WO_2- Co_3O_4 - CoO

- Общая себестоимость эксплуатации оборудования за год

$С_{(баз)} = ЗП_{осн(баз)} + ЗП_{доп(баз)} + З_{енс(баз)} + З_{э(баз)} + А_{о(баз)} + А_{п(баз)} = 685\ 814 + 49744 + 105316,8 + 23889,2 + 170\ 553 + 4800 = 856\ 367$ (Zr,Al)N

$С_{(пр)} = ЗП_{осн(пр)} + ЗП_{доп(пр)} + З_{енс(пр)} + З_{э(пр)} + А_{о(пр)} + А_{п(пр)} = 342\ 907 + 307944 + 65196,04 + 130\ 757,76 + 144000 + 4800 = 473664,76$ WO_3 - WO_2- Co_3O_4 - CoO

$\Delta С = С_б – С_п = 856\ 367 – 473664,76 = 382\ 702,24$

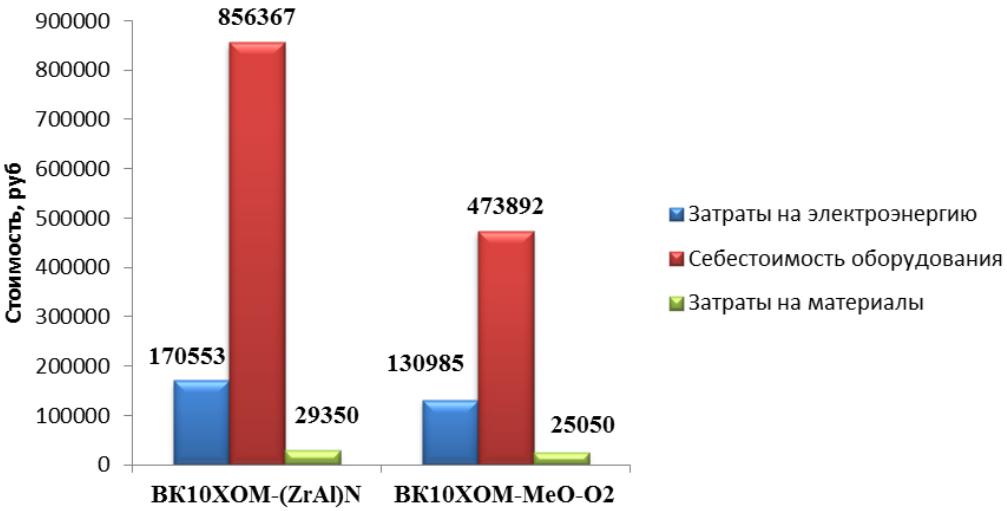


Рисунок 6.16 – Диаграмма расчета экономических показателей нанесения покрытий на твердосплавную фрезу

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.

Эффективность применения режущего инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем

Максимальная эффективность обработки режущим инструментом достигается при оптимальном сочетании факторов резания: оптимальной подачи s, скорости v и времени резания до смены инструмента $T_{ст}$. Эффективность обработки при оптимальном режиме – это максимум того, что можно получить при эксплуатации инструмента по выбранному критерию эффективности. На практике, как правило, принимают производительность процесса обработки деталей. Таким образом, определим производительность режущего инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем при обработке титановых лопаток. Производительность будем оценивать по формуле:

$$П= 10^{-3} \cdot S \cdot V \cdot T_{ст}$$

где: S – площадь поверхности изделия; V - скорость формирования поверхности; $T_{ст}$ – время обработки до смены инструмента.

Таблица 6.2. – Производительность обработки титановых лопаток для двигателя.

Инструментальный материал	$T_{ст}$, мин	$h_з$, мм	V, м/мин	Sм мм/мин
ВК10ХОМ - сплошное покрытие (ZrAl)N	460	0,12	45	490
ВК10ХОМ – диффузионный дискретный оксидный слой (MeO-O_2)	540	0,12	45	490
ВК10ХОМ – без покрытия	350	0,12	45	490

- производительность режущего инструмента с ионно-плазменным покрытием (ZrAl)N:

П= 10^{-3}· 490 · 45 · 460 = 10 143

- производительность режущего инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем MeO-O_2:

П= 10^{-3}· 490 · 45 · 540 = 11 907

- производительность режущего инструмента без покрытия:

П= 10^{-3}· 490 · 45 · 360 = 7938.

Полученные результаты показывают, что производительность режущего инструмента с диффузионным дискретным оксидным слоем MeO-O_2 при фрезеровании титановых лопаток в 1,2 раза больше, чем производительность режущего инструмента с ионно-плазменным покрытием (ZrAl)N и в 1,5 раза без покрытия.

Производственные испытания показали, что режущий инструмент с диффузионным дискретным оксидным слоем MeO-O_2 является эффективным способом повышения долговечности и производительности, (см. рисунок 6.17).

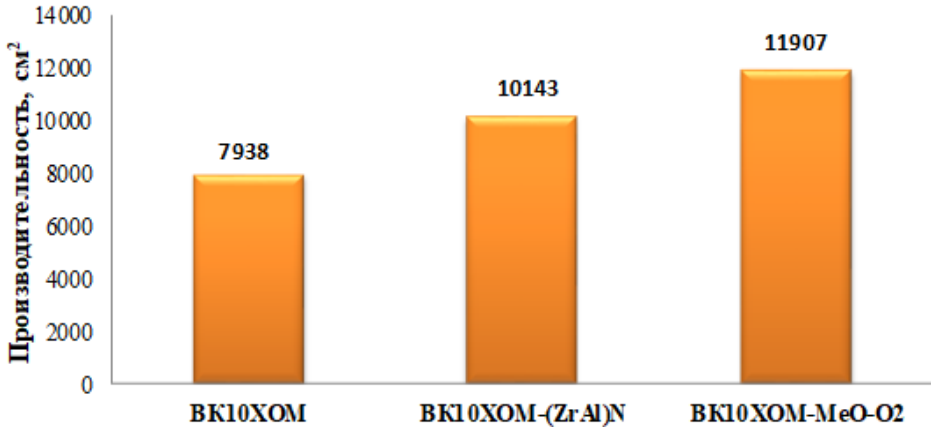


Рисунок 6.17 – Диаграмма расчета производительности твердосплавной фрезы ВК10ХОМ с различными вариантами покрытий

Выводы по главе:

1. Установлено, что инструмент из быстрорежущей стали с диффузионным дискретным оксидным слоем, значительно лучше, чем контрольный инструмент и инструмент со сплошным покрытием, сопротивляется температурному разупрочнению на участках приработочного

и установившегося изнашивания. Причем роль диффузионного дискретного оксидного слоя состоит в сдерживании структуры основного материала инструмента от температурного разупрочнения вследствие повышения теплостойкости, в снижении термомеханических нагрузок на контактные площадки инструмента.

2. Показано, что разработанная технология диффузионного дискретного оксидного слоя позволяет повысить износостойкость резцов с быстрорежущими пластинами Р6М5, Р6М5К5 при продольном точении стали 40Х (НВ220) в 4-5 раз по сравнению с пластинами без покрытия и в 1,5-3 раз по сравнению со сплошным покрытием.

3. Оценка температурного состояния резцов из быстрорежущей стали показала, что для резцов с диффузионным дискретным оксидным слоем температура снижается, примерно на 12% в зоне контакта инструментального и обрабатываемого материалов.

4. Показано, что разработанная технология диффузионного дискретного оксидного слоя позволяет, повысить износостойкость резцов с твердосплавными пластинами IC50M при поперечном точении стали 40Х (НВ220) в 3-4 раза по сравнению с пластинами без покрытия и в 1,8-2,5 раза по сравнению со сплошным покрытием;

5. Показано, что разработанная технология диффузионного дискретного оксидного слоя позволяет повысить износостойкость резцов с твердосплавными пластинами IC3028, IC9015 и IC9025 при продольном точении стали 40Х (НВ220) в 1,5 раза по сравнению с пластинами со сплошным покрытием с использованием смазочно-охлаждающей жидкостью и в 1,8 - 2 раза по сравнению с пластинами со сплошным покрытием;

6. Показано, что разработанный диффузионный дискретный оксидный слой позволяет повысить износостойкость твердосплавных фрез ВК10ХОМ при чистовом фрезеровании титана ВТ6 в 1,8 раза по сравнению со стойкостью контрольных фрез без покрытия и в 1,5 раза по сравнению фрезами со сплошным покрытием, а при черновом фрезеровании титанового

сплава ВТ6 в 1,8 раза по сравнению со стойкостью контрольных фрез без покрытия и в 2 раза по сравнению со стойкостью фрез со сплошными покрытиями. При переточке в 2- 2,5 раза относительно контрольных фрез без покрытия.

7. Установлено, что диффузионный дискретный оксидный слой может быть достаточно эффективен для широкого применения и в тех случаях, когда режущий инструмент подвергается в процессе эксплуатации циклическому нагружению.

8. Установлено, что диффузионный дискретный оксидный слой можно получить на режущем инструменте после переточки. При этом геометрия его не меняется.

9. Диффузионный дискретный оксидный слой $MeO\text{-}O_2$ может быть применен к режущему инструменту, имеющему сложнопрофильную форму режущей части, позволяя тем самым повысить его производительность в 1,2 раза относительно режущего инструмента с ионно-плазменным покрытием (ZrAl)N.

10. Разработанная технология внедрена на АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», АО «МПО им. И. Румянцева» и применена на: ООО «ИТМ», ООО ТД «КАЙЛАС, АО «ММЗ», ПАО «АК Рубин», ООО «РИП».

ГЛАВА 7. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИСКРЕНОГО ДИФФУЗИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

7.1 Промышленная реализация деталей за счет износостойких покрытий

В рамках договора № 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» была разработана и внедрена в производство АО «НПЦГ «Салют»» технология восстановления лопаток на второй ресурс, поскольку данная проблема имелась в современных газотурбинных установках компрессора при эксплуатации, где лопатки испытывают нагрузки от действия центробежных сил, изгибающего и крутящего моментов, знакопеременных нагрузок, вызывающих усталостные разрушения, эрозионные повреждения и др. Для демпфирования колебаний лопаток при работе на двигателе широкое применение нашли конструкции лопаток с бандажными полками, контактные поверхности которых упрочняются износостойкими покрытиями. В качестве основных методов нанесения износостойких покрытий используются детонационное напыление (D – GUN) и высокоскоростное напыление (HVOF). Основным материалом, обеспечивающем износостойкость контактных поверхностей бандажных полок, является кубический монокарбид WC, который относится к классу особо твёрдых материалов. В качестве связующего обычно используют припой ВПр16, либо твердый раствор на основе кобальта или, реже, вольфрам. Вязкое связующее уменьшает склонность карбидов вольфрама к природной хрупкости. При напайке частицы релита могут неоднородно распределиться по объёму расплавляемой смеси в индукторе, поскольку частицы ферромагнитны. В процессе работы двигателя наблюдается выкрашивание крупных фракций (до 250 мм), что существенно снижает срок службы таких покрытий.

В процессе работы на двигателе покрытия изнашиваются, скалываются, растрескиваются и для увеличения ресурса требуется отработка технологии восстановления исходных размеров бандажных полок и самих покрытий. Кроме того, весьма актуальна проблема увеличения долговечности лопаток путем поиска новых решений износостойких материалов и технологий на бандажных полках лопаток ротора компрессора низкого давления.

Комплексный подход к решению поставленных задач предполагает, прежде всего, глубокое изучение механизмов разрушения покрытий в условиях воздействия нестационарных термомеханических нагрузок. Особое место в достижении максимального эффекта высокого качества изготовления деталей машин принадлежит поверхностному упрочнению. В работе предлагается принципиально новое решение проблемы долговечности деталей машин, состоящее в разработке нового типа диффузионных покрытий с дискретной ячеистой структурой нестехиометрического состава, обладающих повышенной износостойкостью.

В связи с эти разработанный диффузионный оксидный слой может служить как в качестве окончательного, так и промежуточного слоя при нанесении многослойных покрытий на лопатки.

В поиске методов увеличения ресурса лопаток применяют технологии нанесения износостойких покрытий, где в качестве барьерного слоя используются разнообразные химические соединения, в том числе на основе оксидов металлов: оксиды вольфрама $W_{18}O_{49}$, $W_{20}O_{58}$, иногда WO_3, а также интерметаллиды Co_3W иCo_7W_6. Помимо основного карбида WC, в порошках присутствует незначительное количество карбида W_2C.

Для восстановления лопаток из сплава ВТ3-1 использовали сплав ВТ20, который наплавляли на чистый материал. Выбор жаропрочного сплава для наплавки на изношенные бандажные полки обусловлен близкими физико-механическими свойствами сплавов ВТ3-1 и ВТ20, а также хорошей технологичностью сплава ВТ20 (см. таблицы 7.1, 7.2).

Применение для наплавки сплава ВТ3-1 с (α + β) структурой, упрочняемого при термической обработке, приводит к тому, что при сварке наблюдается заметное снижение пластичности сварного соединения.

Таблица 7.1 – Химический состав титановых сплавов

Марка сплава	Содержание основных компонентов сплава, %								
	Al	Zr	V	Mo	Cr	Fe	Si	Sn	Mn
ВТ3-1	5,2-6,8	-	-	2-3	1,5-2,5	0,2-0,7	0,25	-	-
ВТ20	5,5-7,5	1,5-2,5	0,8-1,8	0,5-2,0	-	-	-	-	-
ВТ5-1	4-6	-	-	-	-	0,3	0,15	2-3	-
ОТ4-1	1-2,5	-	-	-	-	0,3	0,15	-	0,7-2
ВТ18	6,2-7,3	3,5-4,5	-	0,4-1,0	1,2%Nb	0,15	0,2	2,5	-

Таблица 7.2 – Механические свойства титановых сплавов

Марка сплава	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ,%	φ, %	KCU, Дж/см^2	Ex10^{-5}, МПа
ВТ3-1	1050	900	12	35	30-40	1,15
ВТ20	1000	950	13	40	60	1,2
ВТ5-1	900	800	15	30	70	1,1
ОТ4-1	700	550	20	55	80	1,1
ВТ18	1075	950	13	40	25	1,2

Элементы, стабилизирующие β- фазу (Fe, Ni, Cr, Mn, Si, Mo, W, V и др.), повышают склонность к закалке шва при сварке. Сплавы с α- структурой не требуют термической обработки после сварки в то время, как для (α + β) - сплавов после сварки необходимо проведение термической обработки, обеспечивающей восстановление структуры и механических свойств.

Для оценки свойств покрытия использовали образцы в виде шайб диаметром 60 мм и высотой 10 мм. На шлифованную поверхность образцов наплавляли слой сплава ВТ20 электрической дугой путём расплавления электрода в среде чистого аргона. Внешний вид образцов после наплавки представлен на рисунке 7.1. Поверхность наплавленного металла подвергали фрезерованию с последующим напылением сплава ВК-25 М, после чего одну партию образцов отжигали в вакууме при температуре 540±10°С в течение 2 часов для снятия остаточных термических напряжений, а вторую - оставляли без отжига. Толщина слоя составляла (3,2…3,4) мм.

Рисунок 7.1 – Образцы из сплава ВТ3-1 после удаления дефектного слоя покрытия ВК-25М, наплавки сплава ВТ20 и восстановления размеров алмазным шлифованием.

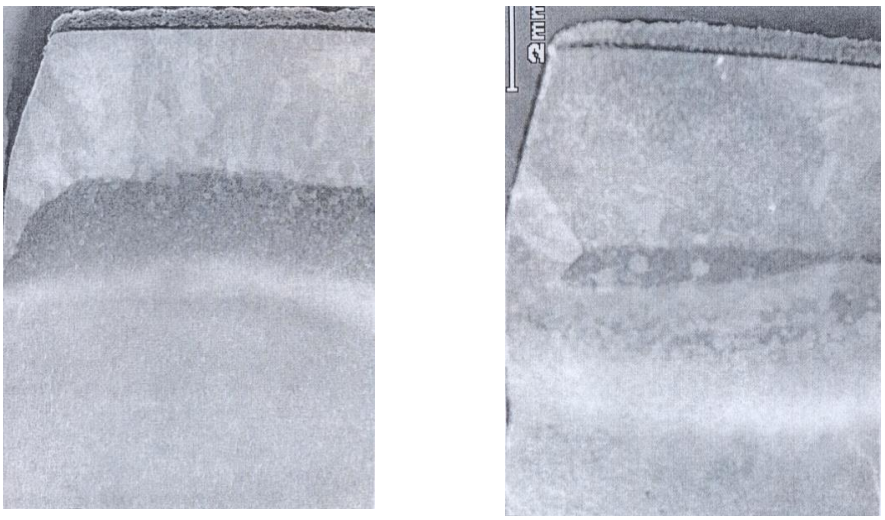
Изменение размеров образцов при обработке представлено в таблице 7.3.

Таблица 7.3 – Изменение размеров образцов после операций, мм

№№ обр.	Удаление ВК-25М	Наплавка ВТ20	Фрезерование ВТ20	Напыление ВК-25М	Шлифование ВК-25М
3	20,32	23,52	22,78	23,15	22,98
31	20,32	23,64	22,60	23,28	23,07
25	14,85	18,18	16,40	16,87	16,40
27	14,85	18,15	16,43	16,90	16,63
29	14,85	18,19	16,40	16,89	16,39
32	14,85	18,25	16,50	17,00	16,70

Твёрдость наплавленного слоя ВТ20 непосредственно после наплавки составила 295 МПа, сплава ВТ3-1 – 318 МПа. После отжига твёрдость наплавленного сплава ВТ20 составила 301 МПа и ВТ3-1 – 332 МПа. Таким образом, твёрдость наплавки ВТ20 и сплава ВТ3-1 изменилась незначительно.

Металлографический анализ показал, что структура наплавленного слоя сплава ВТ20 до отжига и после него - столбчатая, крупнозернистая (см. рисунок 7.2). В структуре наплавленного слоя отсутствуют поры, трещины, включения и другие сварочные дефекты.



до отжига после отжига

Рисунок 7.2 – Микроструктура сплава ВТ3-1 и наплавленного слоя сплава ВТ20 на образцах: а) до отжига; б) после отжига

Для напыления покрытия ВК-25М использовали порошок, состоящий из 75 % карбида вольфрама WC и 25 % металлического кобальта Co.

Нанесение карбидного покрытия ВК-25М осуществляли путем детонационного напыления. Данный метода был применен на установке «Обь», за счет подрыва газовой смеси, содержащей ацетилен и кислород. Продолжительность теплового воздействия газового потока на контактную поверхность составляла не более $3 \cdot 10^{-3}$ с, поэтому температура нагрева поверхности не превышала 150-200 °С. За один «выстрел» толщина осадка покрытия составляла от 5 до 10 мкм.

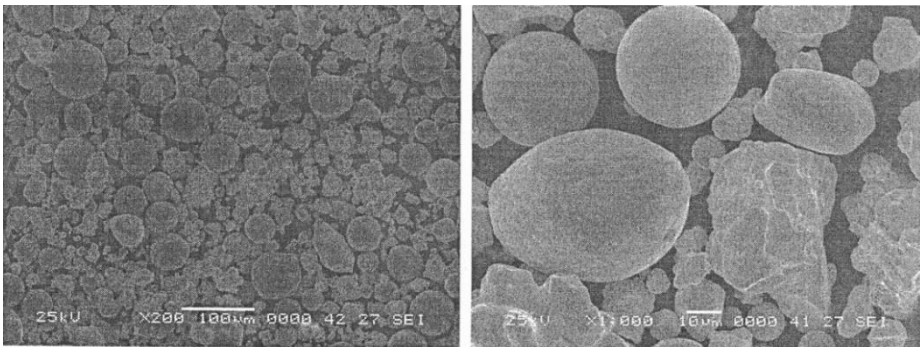
По внешнему виду и по химическому составу покрытия из порошков отличий нет, а по твердости различаются, например покрытие из порошка партии №4 имеет твердость 9330 МПа, а из порошка партии № 6 – 6430 МПа. Контроль гранульного состава порошков WC проводили на аналитической просеивающей машине AS200 через сито 12035266 с ячейкой 40 мкм.

Порошок ВК-25М, в зависимости от поставляемых партий, может существенно отличаться по содержанию топологически плотноупакованных фаз, а также по количеству оксидов вольфрама и объёмному содержанию мелких и крупных частиц карбида вольфрама в партиях. В одних партиях содержание частиц WC размером менее 20 мкм составляет более 50%

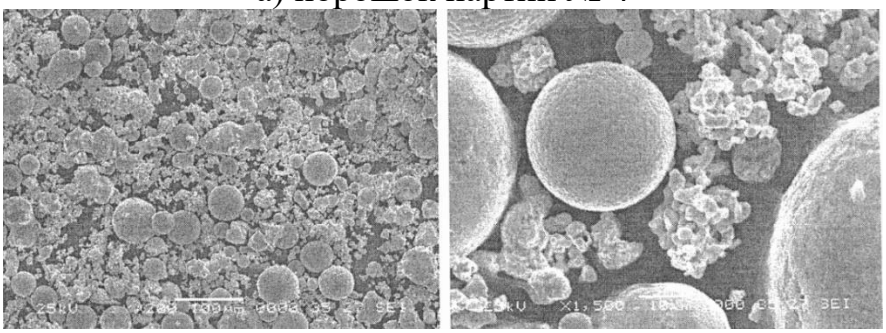
объёмных, а в других партиях – менее 35-40% объёмных. Кроме того, в партиях порошка ВК-25М, нередко наблюдаются многочисленные частицы карбида вольфрама грубой пластинчатой формы, которые снижают качество покрытий и заметно влияют на ресурс лопаток компрессора.

Образцы с покрытием ВК-25М из партий №4 и №6 испытали на адгезию. Твердость определяли на твердомере Виккерса. Фотографии гранул порошков представлены на рисунке 7.3, а микроструктуры покрытий на исследованных лопатках на рисунке 7.4.

Результаты рентгенографического анализа поставляемых порошков и полученных из этих порошков покрытий, нанесенных по технологии «Салют» представлены на рисунках 7.5 – 7.8.



а) порошок партии № 4



б) порошок партии № 6

Рисунок 7.3 – Фото частиц порошка.

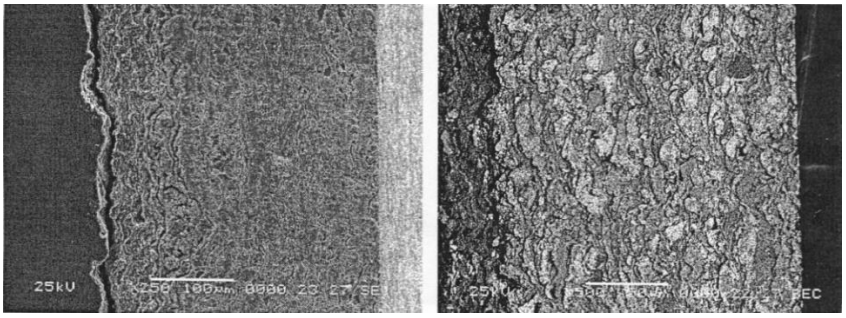


Рисунок 7.4 – Микроструктуры покрытий.

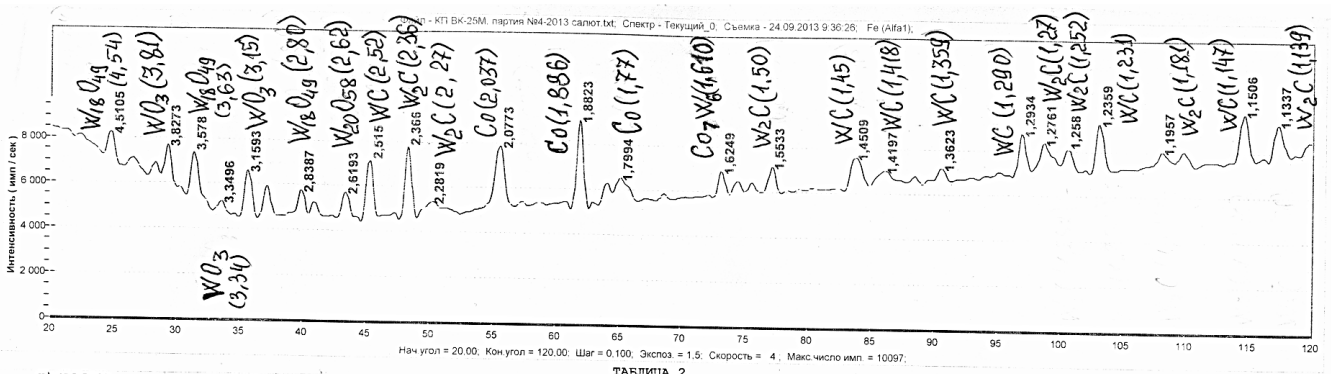


ТАБЛИЦА 2

№\(Alfa1)	Угол	Площадь	Интенс.	Полушир.	Межплск.	% Макс.	% Площ
1	24,785	281,70	513	0,5063	4,5105	28,68	29,13
2	29,300	405,15	736	0,5076	3,8273	41,14	41,90
3	31,392	475,31	842	0,5204	3,5780	47,07	49,15
4	33,595	67,87	162	0,3870	3,3496	9,06	7,02
5	35,684	523,17	892	0,5408	3,1593	49,86	54,10
6	37,168	360,08	592	0,5611	3,0373	33,09	37,23
7	39,875	288,68	502	0,5305	2,8387	28,06	29,85
8	43,377	233,84	423	0,5097	2,6193	23,64	24,18
9	45,273	564,12	1072	0,4852	2,5150	59,92	58,33
10	48,300	699,35	1348	0,4787	2,3660	75,35	72,32
11	50,200	84,62	132	0,5899	2,2819	7,38	8,75
12	55,547	967,05	1274	0,7350	2,0773	67,86	100,00
13	67,895	936,80	1789	0,4831	1,8823	100,00	96,87
14	65,089	430,24	438	0,9054	1,7994	24,48	44,49
15	73,128	264,96	482	0,5071	1,6249	26,94	27,40
16	74,378	147,68	260	0,5238	1,6014	14,53	15,27
17	77,099	298,42	545	0,5054	1,5533	30,46	30,86
18	83,696	542,23	630	0,7942	1,4509	35,22	56,07
19	85,972	424,59	277	1,4138	1,4197	15,48	43,91
20	90,562	206,05	305	0,6237	1,3623	17,05	21,31
21	96,901	653,30	988	0,6103	1,2934	55,23	67,56
22	98,676	765,04	699	1,0103	1,2761	39,07	79,11
23	100,609	471,64	542	0,8022	1,2580	30,30	48,77
24	103,112	747,62	1134	0,6085	1,2359	63,39	77,31
25	108,100	460,03	362	1,1728	1,1957	20,23	47,57
26	114,559	815,16	1258	0,5977	1,1506	70,32	84,29
27	117,263	679,82	956	0,6561			

Рисунок 7.5 – Фазовый состав порошка партии №4

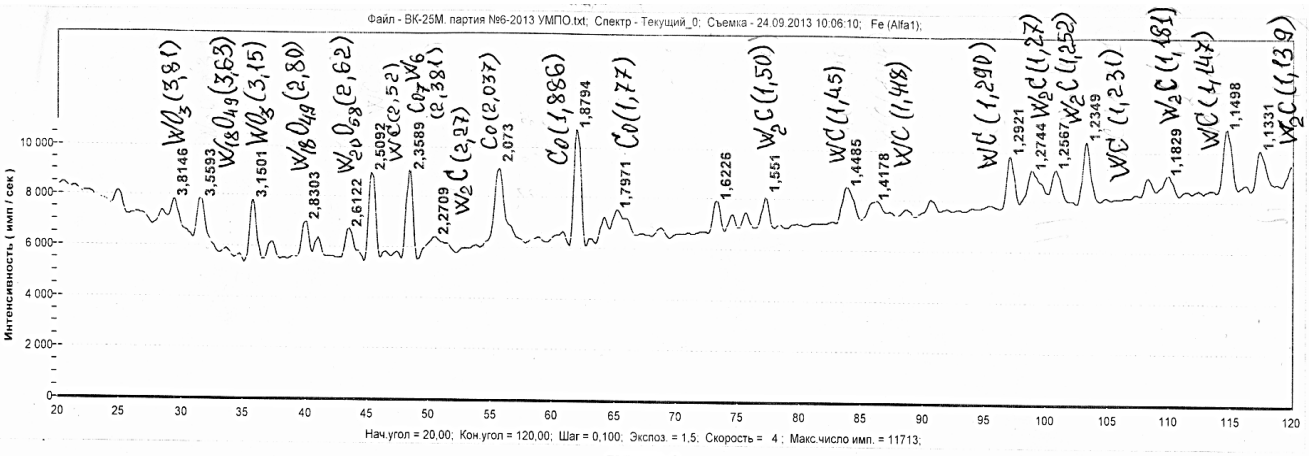


ТАБЛИЦА 2

№\(Alfa1)	Угол	Площадь	Интенс.	Полушир.	Межплск.	% Макс.	% Площ
1	29,400	285,55	461	0,5718	3,8146	21,50	25,10
2	31,562	335,51	595	0,5199	3,5593	27,75	29,50
3	35,792	647,22	1087	0,5492	3,1501	50,70	56,90
4	37,284	161,61	301	0,4954	3,0283	14,04	14,21
5	39,999	355,21	645	0,5077	2,8303	30,08	31,23
6	43,500	262,10	457	0,5291	2,6122	21,32	23,04
7	45,384	788,19	1493	0,4868	2,5092	69,64	69,29
8	48,454	805,22	1469	0,5059	2,3589	68,52	70,79
9	50,460	145,94	167	0,8073	2,2709	7,79	12,83
10	55,673	1101,99	1340	0,7585	2,0730	62,50	96,88
11	62,000	1137,52	2144	0,4895	1,8794	100,00	100,00
12	65,180	469,25	468	0,9256	1,7971	21,83	41,25
13	73,249	275,82	532	0,4780	1,6226	24,81	24,25
14	77,233	304,93	537	0,5241	1,5510	25,05	26,81
15	83,867	548,27	619	0,8164	1,4485	28,87	48,20
16	86,114	404,62	307	1,2147	1,4178	14,32	35,57
17	97,032	655,89	1100	0,5499	1,2921	51,31	57,66
18	98,848	827,85	686	1,1134	1,2744	32,00	72,78
19	100,751	571,81	677	0,7795	1,2567	31,58	50,27
20	103,234	821,65	1309	0,5791	1,2349	61,05	72,23
21	109,837	472,52	433	1,0077	1,1829	20,20	41,54
22	114,680	902,90	1480	0,5629	1,1498	69,03	79,37
23	117,363	651,38	914	0,6574	1,1331	42,63	57,26

Рисунок 7.6 – Фазовый состав порошка партии № 6

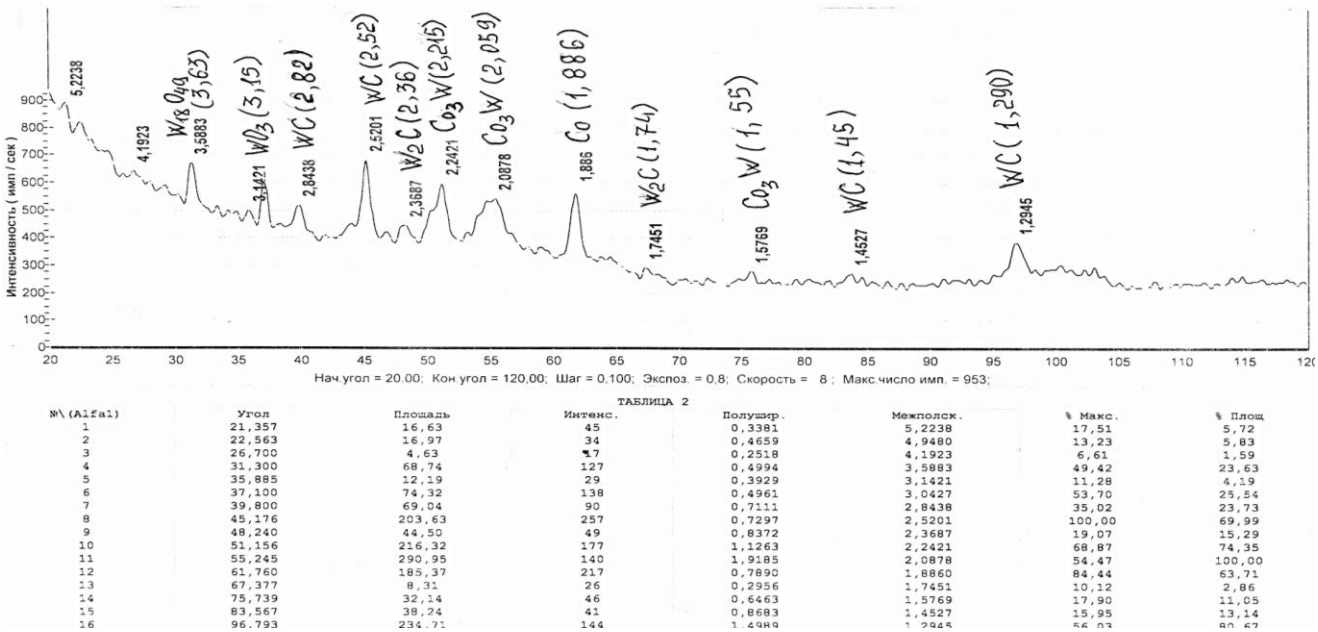


ТАБЛИЦА 2

№\(Alfa1)	Угол	Площадь	Интенс.	Полушир.	Межплоск.	% Макс.	% Площ
1	21,357	16,63	45	0,3381	5,2238	17,51	5,72
2	22,563	16,97	34	0,4659	4,9480	13,23	5,83
3	26,700	4,63	17	0,2518	4,1923	6,61	1,59
4	31,300	68,74	127	0,4994	3,5883	49,42	23,63
5	35,885	12,19	29	0,3929	3,1421	11,28	4,19
6	37,100	74,32	138	0,4961	3,0427	53,70	25,54
7	39,800	69,04	90	0,7111	2,8438	35,02	23,73
8	45,176	203,63	257	0,7297	2,5201	100,00	69,99
9	48,240	44,50	49	0,8372	2,3687	19,07	15,29
10	51,156	216,32	177	1,1263	2,2421	68,87	74,35
11	55,245	290,95	140	1,9185	2,0878	54,47	100,00
12	61,760	185,37	217	0,7890	1,8860	84,44	63,71
13	67,377	8,31	26	0,2956	1,7451	10,12	2,86
14	75,739	32,14	46	0,6463	1,5769	17,90	11,05
15	83,567	38,24	41	0,8683	1,4527	15,95	13,14
16	96,793	234,71	144	1,4989	1,2945	56,03	80,67

Рисунок 7.7 – Фазовый состав покрытия ВК-25М из порошка партии № 6

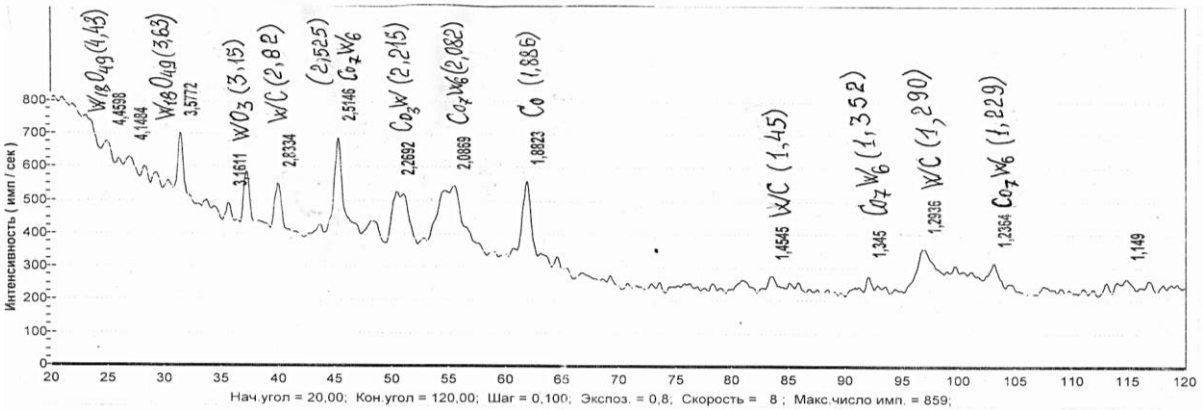


ТАБЛИЦА 2

№\(Alfa1)	Угол	Площадь	Интенс.	Полушир.	Межплоск.	% Макс.	% Площ
1	25,071	3,38	13	0,2410	4,4598	4,85	0,94
2	26,987	10,26	22	0,4362	4,1484	8,21	2,86
3	31,400	84,41	169	0,4595	3,5772	63,06	23,51
4	35,663	18,90	43	0,4052	3,1611	16,04	5,26
5	37,200	69,64	143	0,4492	3,0348	53,36	19,39
6	39,953	78,33	126	0,5738	2,8334	47,01	21,81
7	45,280	209,90	268	0,7224	2,5146	100,00	58,46
8	50,500	181,44	139	1,2044	2,2692	51,87	50,53
9	55,270	359,06	160	2,0693	2,0869	59,70	100,00
10	61,896	176,42	223	0,7308	1,8823	83,21	49,13
11	83,445	36,31	44	0,7699	1,4545	16,42	10,11
12	92,057	26,94	60	0,4176	1,3450	22,39	7,50
13	96,880	236,14	126	1,7356	1,2936	47,01	65,77
14	103,054	111,12	77	1,3260	1,2364	28,73	30,95
15	114,799	52,01	34	1,4222	1,1490	12,69	14,48

Рисунок 7.8 – Фазовый состав покрытия ВК-25М из порошка партии № 4

В результате исследований фазового состава порошка получено, что порошок партии №4 состоит из карбидов WC и W_2C, частиц кобальта и оксидов $W_{18}O_{49}$, $W_{20}O_{58}$, WO_3, а порошок партии №6 состоит из карбидов WC и W_2C, частиц кобальта, интерметаллида Co_7W_6и оксидов $W_{18}O_{49}$, $W_{20}O_{58}$, WO_3.

Рентгенофазовый анализ показал следующие результаты:

– порошки партий №4 и №6 идентичны по своему фазовому составу;

– фазовый состав покрытия соответствует фазовому составу порошков, используемых для напыления;

– твердость и адгезия покрытия к материалу лопатки при напылении из партии №4 и №6 удовлетворяют требованиям ТУ предприятия;

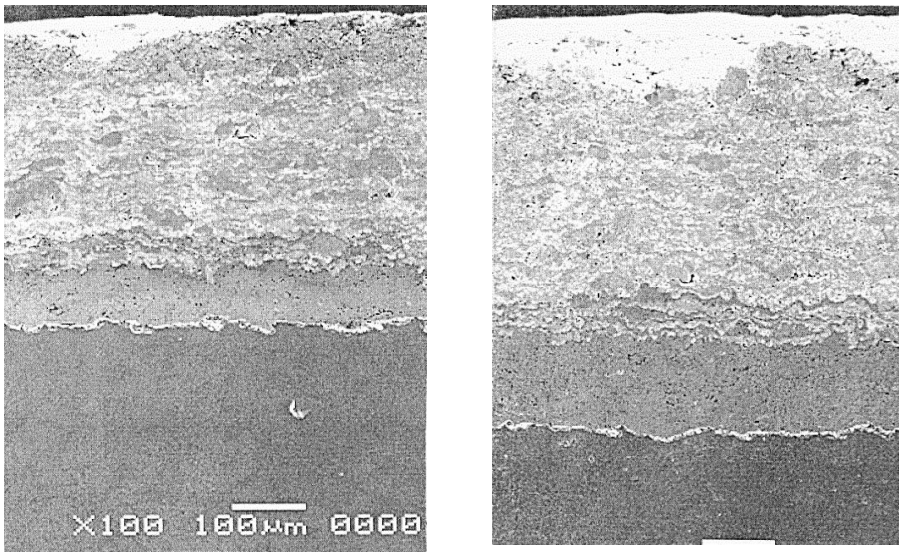
– качество покрытия, полученного из партии №4 высокое – покрытие плотное, малопористое, однородное;

– лопатки с покрытием из партии №6 имеют наработку около 400 часов, покрытие имеет общую толщину (0,225…0,230)мм. Твердость покрытия HV = 6430 МПа;

– на лопатках с покрытием из партии №4 имеют наработку около 8 часов, покрытие имеет общую толщину (0,310…0,320)мм. Твердость покрытия HV = 9330 МПа.

Таким образом, для нанесения покрытия был выбран порошок партии №4. Структура покрытия ВК-25М, наносимого на наплавленный сплав ВТ20, плотная, имеет высокую адгезию к сплаву. Толщина составляет 0,25 - 0,28мм и содержит (3 - 4)% С, (72 - 74)% вольфрама и (23 - 24)% кобальта.

В результате восстановления лопаток, структура покрытия ВК-25М, наносимого на наплавленный сплав ВТ20, как на отожжённом, так и на не отожжённом образцах идентичная, плотная, имеет высокую адгезию к сплаву (см. рисунок 7.9) и толщина переходного слоя (0,07…0,08) мм.



до отжига после отжига

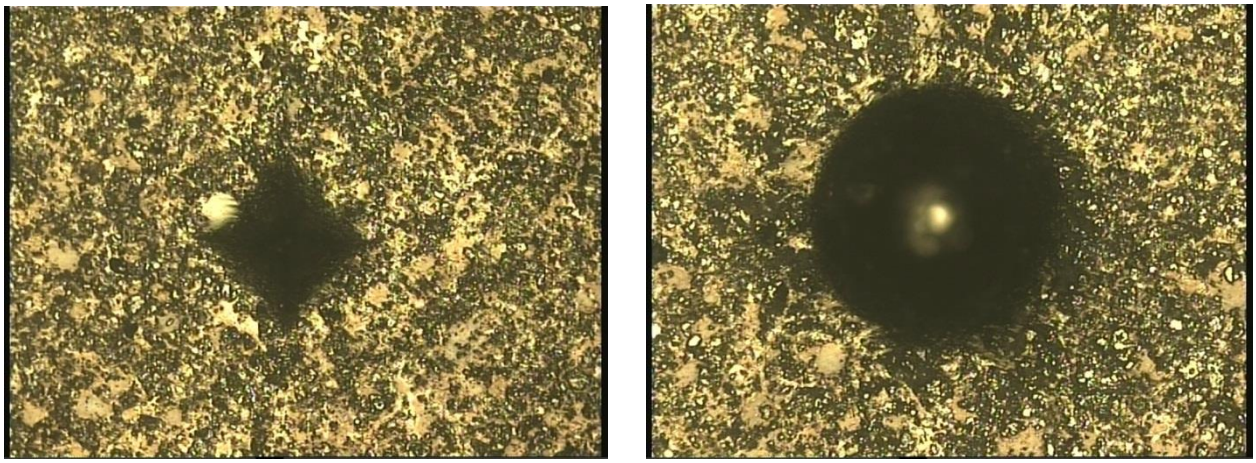
Рисунок 7.9 - Микроструктура восстановленного покрытия ВК-25М на образцах наносимого на наплавленный сплав ВТ20

Удаление избыточного наплавленного металла с бандажной полки лопатки убирали механическим путем, затем наносили покрытие ВК-25М и снова механически обрабатывали под размер согласно чертежу и окончательно упрочняли методом дискретного оксидирования. Толщина дискретного диффузионного оксидного упрочнения составляет 0,08мм.

В наплавленном сплаве ВТ20 отмечается некоторое уменьшение содержания алюминия, которое может быть связано с выгоранием при наплавке. В переходном слое содержится (39…40)% вольфрама, (20…22)% кобальта, (23…25)% никеля, (6,18…7,83)% хрома и (1,55…2,09)% алюминия. В подслое содержится 75% никеля, 18% хрома и (6,54…6,65)% алюминия.

Таким образом, структура покрытия на сплаве ВТ20 после восстановления размеров практически не имеет заметных отличий от структуры покрытия на сплаве ВТ3-1.

Испытаниями на трещиностойкость установлено, что покрытие не растрескивается при вдавливании алмазной пирамиды под нагрузкой 50 кг и алмазного конуса под нагрузкой 100 кг (см. рисунок 7.10).



а) б)

Рисунок 7.10 - Внешний вид отпечатков, оставленных на поверхности восстановленного покрытия ВК-25М на образцах: а) после вдавливания алмазной пирамидой с нагрузкой 50 кг; б) после вдавливания алмазным конусом с нагрузкой 100 кг.

Микротвёрдость покрытия, замеренная на приборе МНТ10 с нагрузкой 100 г, составила HV = (11,43…11,85) $\cdot 10^3$ МПа.

На рисунке 7.11 приведена микроструктура сплава ВТ3-1 и покрытия на лопатке компрессора.

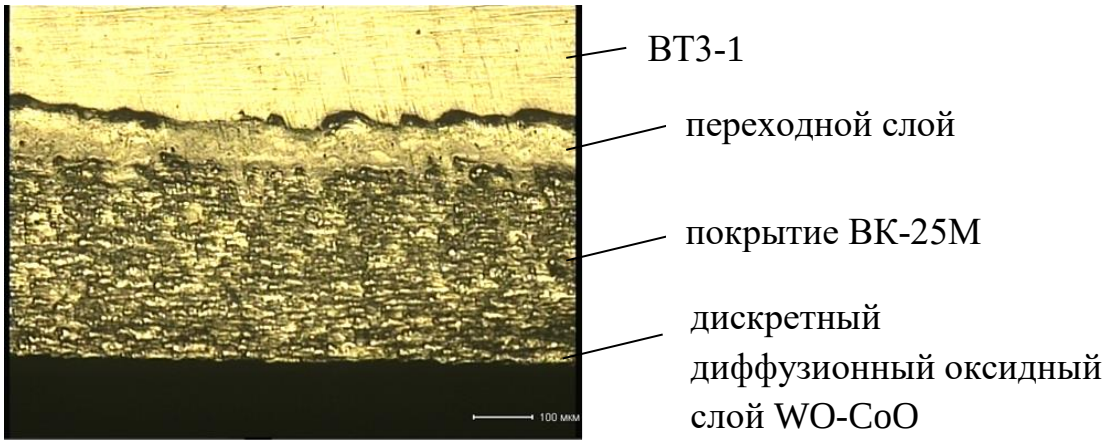
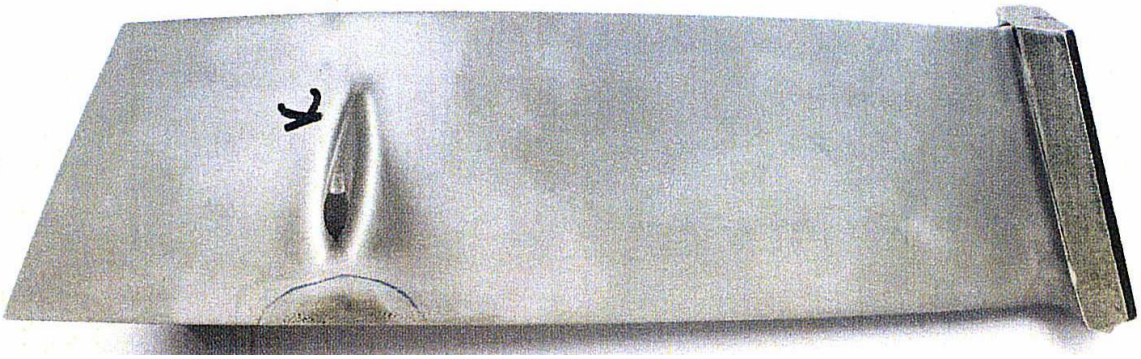
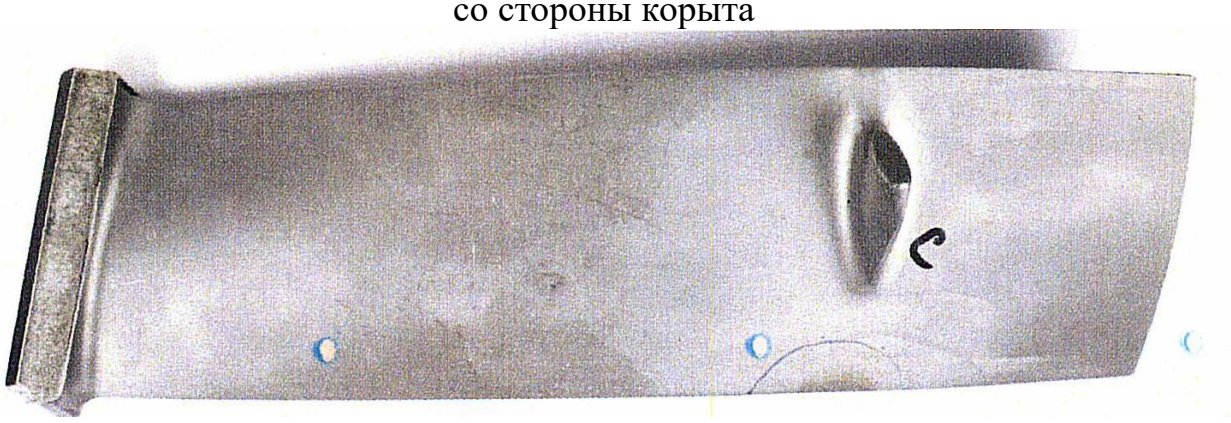


Рисунок 7.11 – Микроструктура сплава ВТ3-1 и покрытия на лопатке компрессора.

На рисунке 7.12 представлена рабочая лопатка ротора компрессора, прошедшая ремонт после наработки.

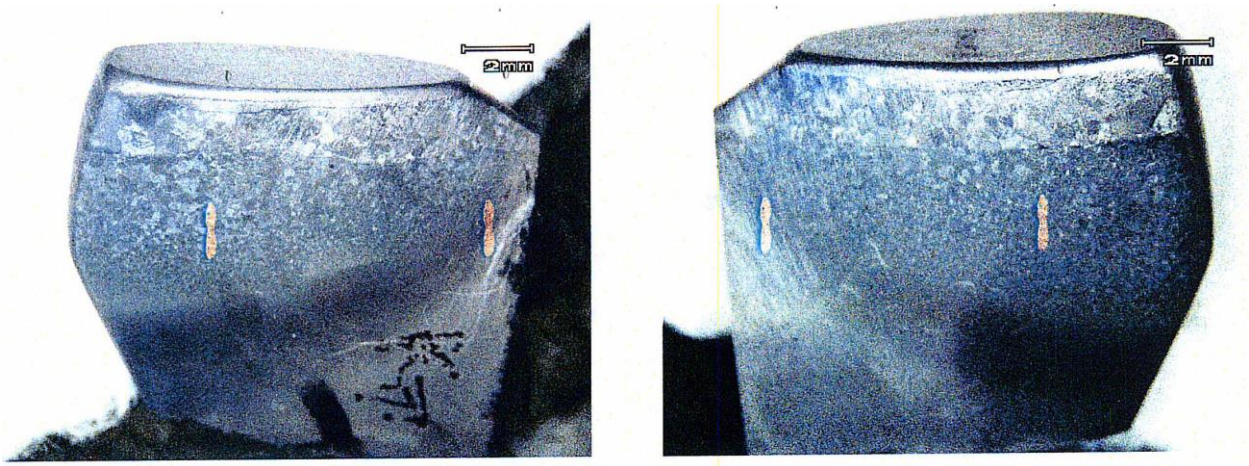


со стороны корыта



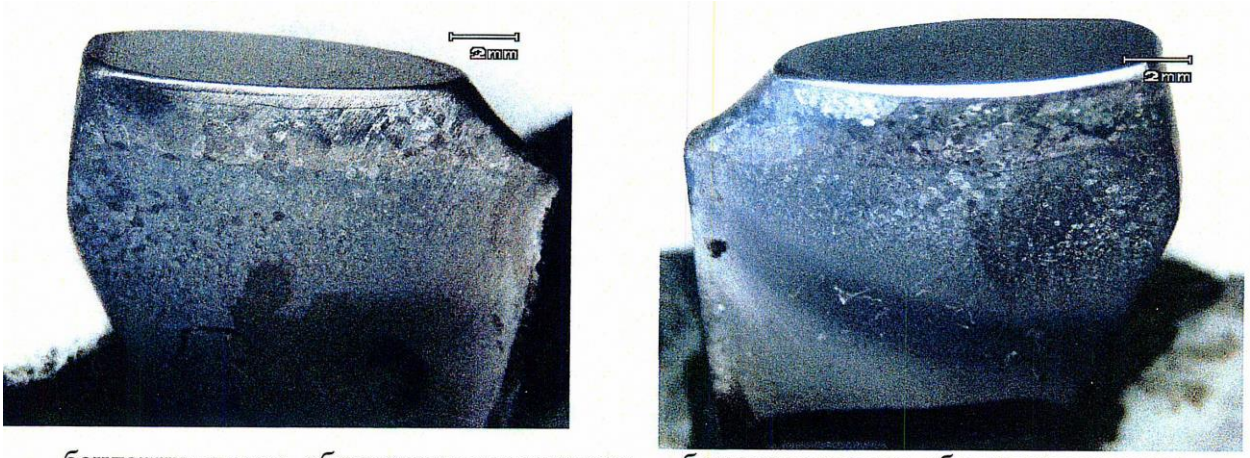
со стороны спинки

а) общий вид лопаток



бандажная полка, обращенная к торцу пера бандажная полка, обращенная к замку

б) со стороны корыта



бандажная полка, обращенная к торцу пера бандажная полка, обращенная к замку

в) со стороны спинки

Рисунок 7.12 – Внешний вид лопаток компрессора после ремонта.

Надежность и долговечность лопаток компрессора в значительной степени зависят от различных параметров, в частности к одним из таких относится остаточное напряжение

Характер распределения остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя оценивали по методу «Давиденкова». Этот метод определяет объемные напряжения 1-го рода. Он основан на вырезке из детали образца кусочка и послойном удалении с него исследуемых слоев путем электрохимического травления. При этом происходит нарушения равновесия, в результате чего образец деформируется. По величине

изменения деформации оставшейся части образца, с изменением глубины залегания исследуемых слоев, рассчитывают остаточные напряжения.

В результате были получены данные, и построены эпюры остаточных напряжений, которые представлены на рисунке 7.13.

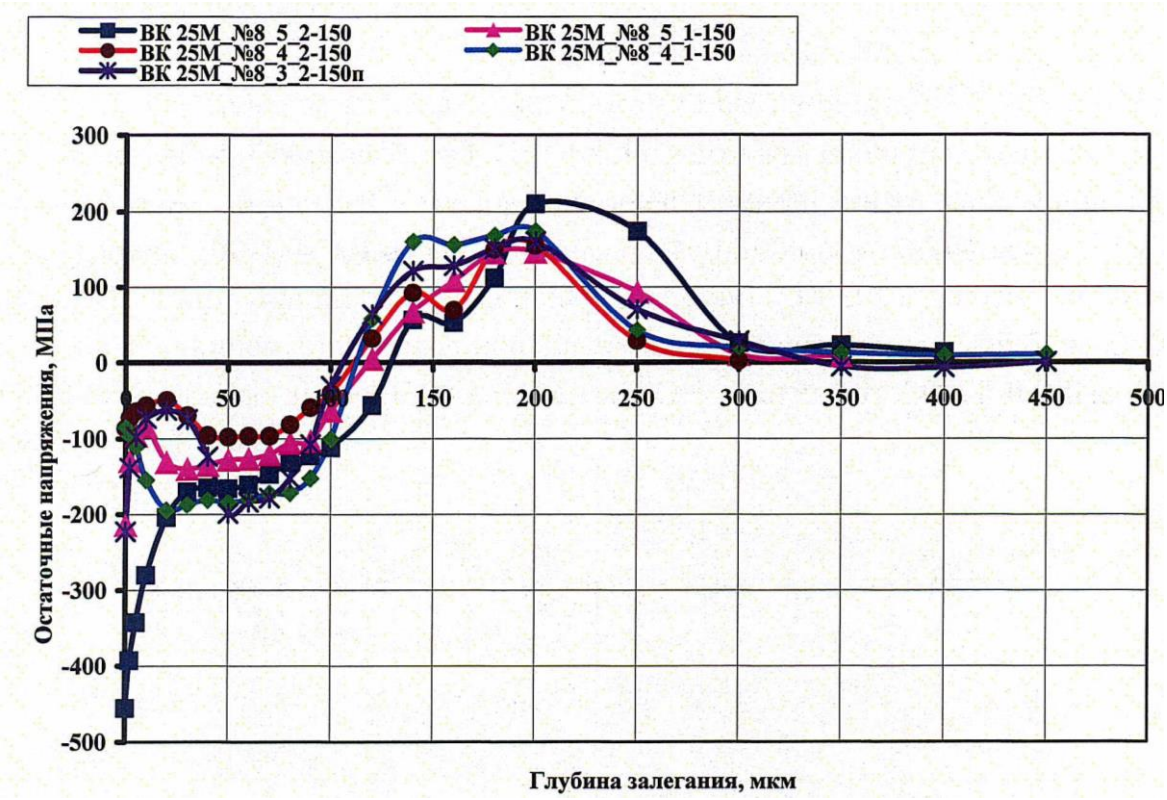


Рисунок 7.13 – Характер распределения остаточных напряжений на титановом сплаве ВТ3-1 с покрытием ВК-25М.

Анализ эпюр показал, что остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое – 100÷200МПа, глубина залегания до 20÷80мкм; а на глубине от 80÷180мкм наблюдается переход от сжимающих к растягивающим. Максимальное значение растягивающих остаточных напряжений – 130÷180МПа, глубина залегания 80÷180мкм.

Таким образом, разработана промышленная технология восстановления геометрических размеров бандажных полок лопаток компрессора при ремонте наплавкой титанового сплава ВТ20 и восстановления износостойкого покрытия на второй ресурс.

7.2 Прочность образцов из интерметалидов и титановых сплавов с диффузионным дискретным оксидным слоем

При работе двигателя лопатки компрессора подвергаются изнашиванию, образованию забоин от попадания посторонних предметов и воздействия твёрдых пылевых частиц. Ввиду высокой интенсивности работы, лопаткам требуется специальная защита, увеличивающая их ресурс. Согласно государственному контракту № Р/415611221075 (КНР) от 30.12.2015 и по дополнению 015611221560-11 DMAC\SFB577RF и основным требованиям к деталям газотурбинных установок необходимо было решить вопрос по повышению надежности и долговечности, как с новыми материалами, так и с действующими. Поскольку основными повреждающими факторами для лопаток компрессора является изнашивание входных кромок, то одним из направлений, обеспечивающих, увеличение эксплуатационных характеристик был использован метод нанесения дискретного диффузионного оксидного слоя, применяемый на заключительной стадии изготовления.

Повышение прочности поверхности лопаток, за счет дискретного диффузионного оксидного слоя, достигается растворением в титане атомов кислорода. Пластическая деформация сопровождается разрушением кристаллической решетки и образованием большого количества дефектов, препятствующих перемещению дислокаций. Этим объясняется упрочение материала. Образование краевых дислокаций вызвано присутствием в кристаллической решетке неполных кристаллографических плоскостей.

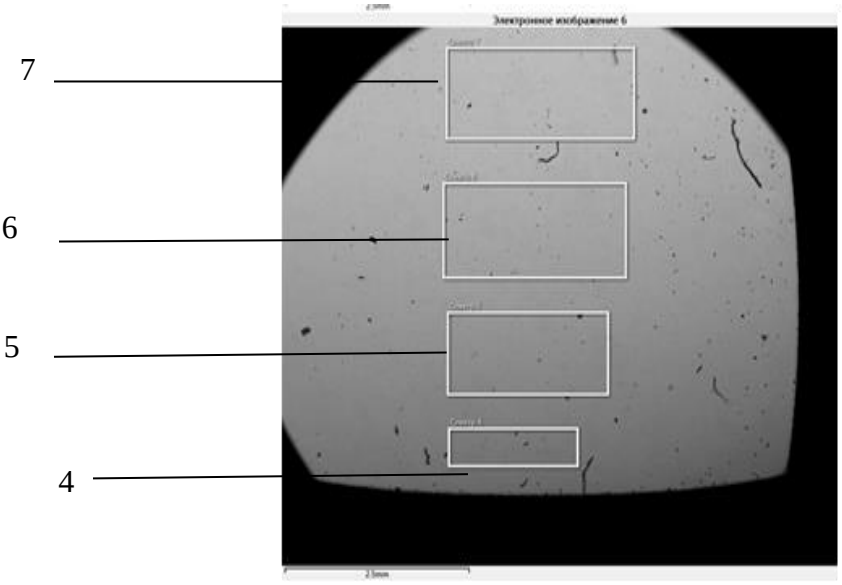
Исследовались образцы из титанового сплава ВТ3–1 и ВТ-41 с дискретным диффузионным оксидным слоем (MeO-O_2), со сплошным (уплотнительным) покрытием (AlBN-SiO_2) и сравнивались с контрольной партией образцов без покрытия, а также исследовали образцы из интерметалидов ВТИ-4 и ВИТ1 с дискретным диффузионным оксидным слоем (MeO-O_2), и без упрочнения.

Микрорентгеновский спектральный анализ химического состава выполнен методом МРСА, который позволяет определить содержание

элементов локального диффузионного покрытия с пошаговым сканированием образца электронным зондом в направлении перпендикулярном боковой поверхности образца в сечении микрошлифа.

Исследование проводилось непосредственно с поверхности образцов на электронном микроскопе «JSM-5610 LV» (см. главу 3).

На рисунке 7.14 показана спектральная структура интерметаллида ВИТ-1 после упрочнения, а результат химического анализа содержания элементов дискретного диффузионного оксидного слоя показан в таблице.



Название спектра	**O**	Al	Si	Ti	Zr	Nb	Ta	W	Сумма
Спектр 4	**10.64**	**9.11**	0.46	**40.01**	1.93	**35.99**	0.82	1.04	100.00
Спектр 5	**10.62**	**9.18**	0.40	**39.74**	1.98	**36.01**	0.94	1.14	100.00
Спектр 6	**13.12**	**8.96**	0.42	**38.62**	2.00	**35.10**	0.81	0.99	100.00
Спектр 7	**14.57**	**8.89**	0.34	**37.90**	1.87	**34.40**	0.92	1.11	100.00
Основа	0.05	**11.12**	0.19	**43.95**	2.28	**39.9**	1.16	0.91	100.00

Рисунок 7.14 – Результат микрорентгеновского спектрального анализа сплава ВИТ-1.

Из таблицы видно, что содержание элементов Ti, Al и Nb уменьшилось, а содержание элементов Si, W, Zr, Mo, Ta практически не изменялось, в то же время установлено, что кислород присутствует только в поверхностном слое и его содержание составляет, примерно 10,62-14,57% (см. рисунок 7.14).

Таким образом, можно утверждать, что уменьшение содержания – Ti, Al, Nb в поверхностном слое обусловлено протеканием процесса окисления и

образования оксидов: титана TiO_2(анатаз) и Al_2O_3(корунд) и образования интерметаллидов Ti_3Al и Ti_2AlNb(орто-сплав β_2).

Исследование макроструктуры показало, что данная оксидная плёнка, полученная диффузионным способом, имеет поликристаллическую структуру. В режиме обратно-отраженных электронов насыщаемая кислородом поверхность образца имеет тонкую оксидную пленку, (см. рисунок 7.15).

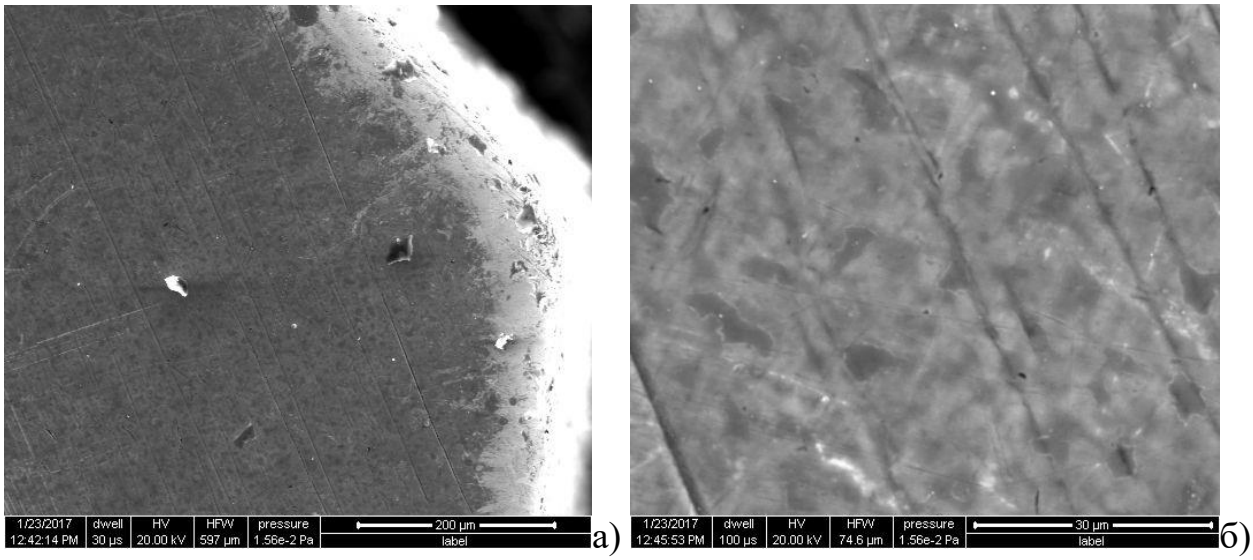


Рисунок 7.15 – Макроструктура поверхности образца после дискретного диффузионного упрочнения. а) - х250; б) -х2000

Исследование фазового состава проводили на дифрактометре «Дрон 6» в Fe - Kα излучении. Рентгеноструктурный анализ установил наличие оксидов на поверхности после упрочнения: (TiO_2) - анатаз и α-Al_2O_3 (корунд) и образования интерметаллидов Ti_3Al(α_2-фаза) и Ti_2AlNb(β_2), (см. рисунок 7.16).

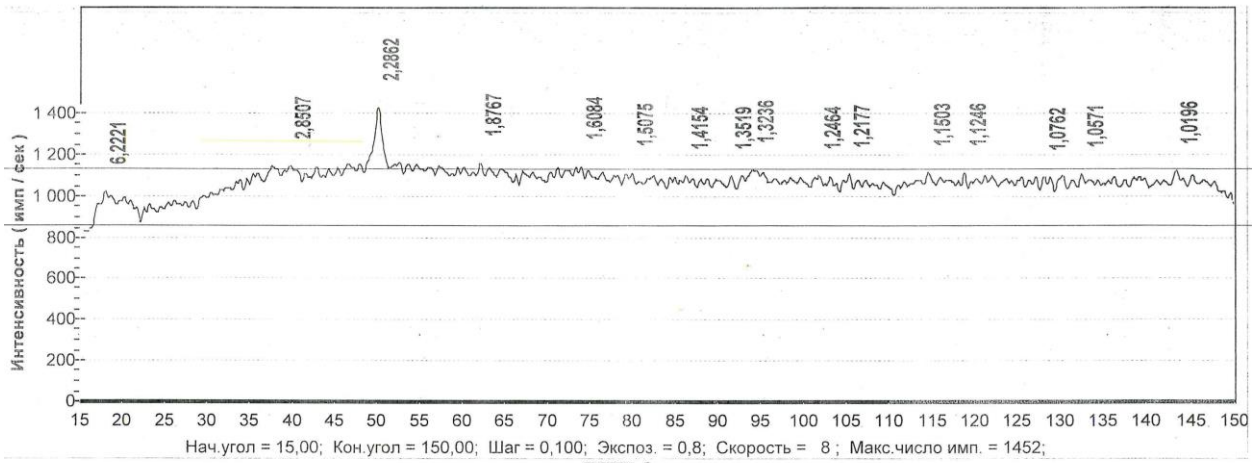


ТАБЛИЦА 2

№\(Alfa1)	Угол	Площадь	Интенс.	Полушир.	Межплоск.	% Макс.	% Площ
1	17,900	524,53	175	2,7602	6,2221	38,55	46,65
2	39,700	725,74	271	2,4742	2,8507	59,69	64,55
3	50,100	1124,39	454	2,2858	2,2862	100,00	100,00
4	62,100	602,59	254	2,1909	1,8767	55,95	53,59
5	74,000	462,82	228	1,8711	1,6084	50,22	41,16
6	79,900	240,33	196	1,1292	1,5075	43,17	21,37
7	86,300	316,78	179	1,6313	1,4154	39,43	28,17
8	91,454	196,43	146	1,2439	1,3519	32,16	17,47
9	94,000	538,87	206	2,4172	1,3236	45,37	47,93
10	101,900	285,30	155	1,6985	1,2464	34,14	25,37
11	105,300	246,34	181	1,2532	1,2177	39,87	21,91
12	114,600	267,30	157	1,5691	1,1503	34,58	23,77
13	118,794	164,38	158	0,9596	1,1246	34,80	14,62
14	128,168	171,56	127	1,2472	1,0762	27,97	15,26
15	130,220	154,63	133	1,0733	1,0671	29,30	13,75
16	132,600	303,48	129	2,1676	1,0571	28,41	26,99
17	143,376	194,43	170	1,0574	1,0196	37,44	17,29

а.

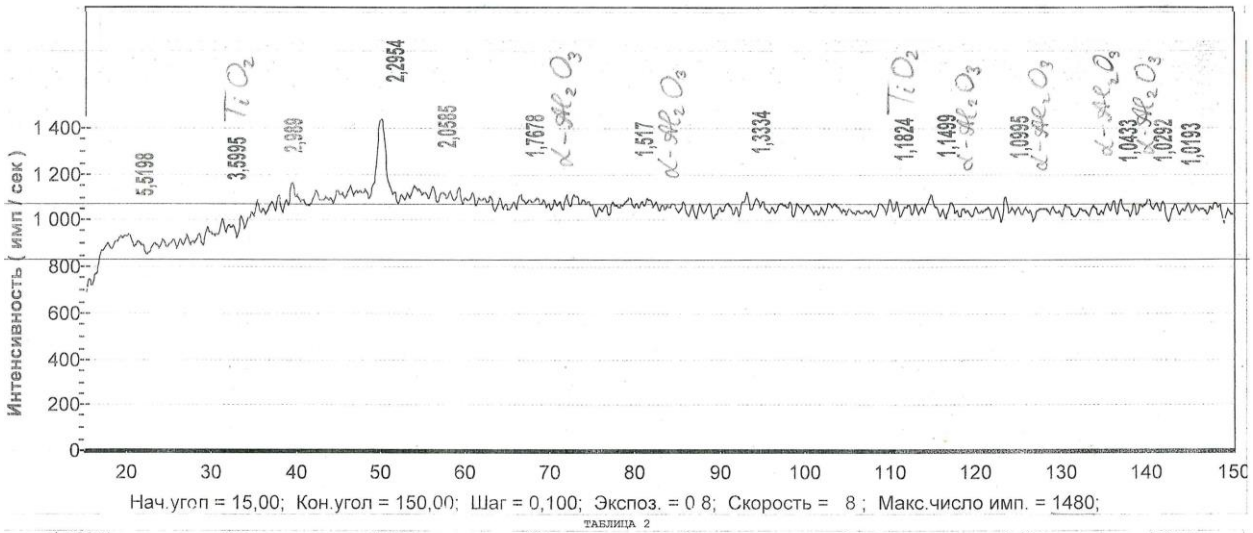


ТАБЛИЦА 2

№\(Alfa1)	Угол	Площадь	Интенс.	Полушир.	Межплоск.	% Макс.	% Площ
1	20,200	365,91	202	1,6687	5,5198	36,27	26,26
2	31,200	442,41	240	1,6997	3,5995	43,09	31,74
3	37,791	392,13	295	1,2257	2,9890	52,96	28,14
4	39,400	492,35	374	1,2158	2,8715	67,15	35,33
5	49,886	1393,67	557	2,3102	2,2954	100,00	100,00
6	56,100	967,22	326	2,7338	2,0585	58,53	69,40
7	66,400	485,34	290	1,5446	1,7678	52,06	34,82
8	79,300	746,47	236	2,9179	1,5170	42,37	53,56
9	93,100	353,62	220	1,4858	1,3334	39,50	25,37
10	109,900	192,04	174	1,0185	1,1824	31,24	13,78
11	114,658	314,64	156	1,8570	1,1499	28,01	22,58
12	117,100	249,84	145	1,5846	1,1347	26,03	17,93
13	123,376	143,90	175	0,7578	1,0995	31,42	10,32
14	136,200	198,02	104	1,7613	1,0433	18,67	14,21
15	140,265	294,16	90	3,0136	1,0292	16,16	21,11
16	143,472	52,62	101	0,4798	1,0193	18,13	3,78

б.

Рисунок 7.16 – Фазовый состав образца: а- без дискретного оксидного слоя; б- с дискретным оксидным слоем.

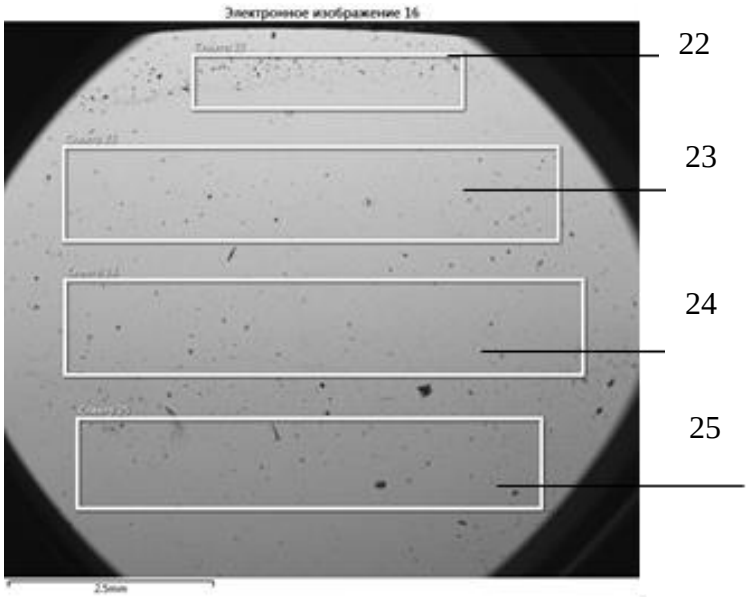
Металлографические исследования по цветам побежалости также показали наличие оксидов: оксид титана (анатаз) $TiO_2(\alpha)$; оксид алюминия

(корунд) $Al_2O_3(\alpha)$ и интерметаллиды $Ti_3Al(\alpha_2$-фаза) и $Ti_2AlNb(\beta_2)$, (см. рисунок 7.17). При этом структура основного сплава не претерпевает заметных изменений в поверхностном слое, поскольку процесс происходит при ионизации коронного разряда, ионы кислорода взаимодействуют с атомами сплава и образуют тонкую оксидную пленку.

Рисунок 7.17 – Интерференция цвета побежалости на поверхности образца ВИТ1 после диффузионного дискретного оксидного слоя

Аналогично был исследован интерметаллид ВТИ-4. На рисунке 7.18 показан микрорентгеновский спектральный анализ химического состава образца с диффузионным дискретным оксидным слоем, а результат химического анализа содержания элементов диффузионного дискретного оксидного слоя показан в таблице.

Из таблицы видно, что содержание элементов Ti, Al и Nb уменьшилось, а содержание элементов Si,, V, Zr, Mo, Ta практически не изменялось, в то же время установлено, что кислород присутствует только в поверхностном слое покрытия и его содержание составляет, примерно 8,5-9,2% (см. рисунок 7.18).

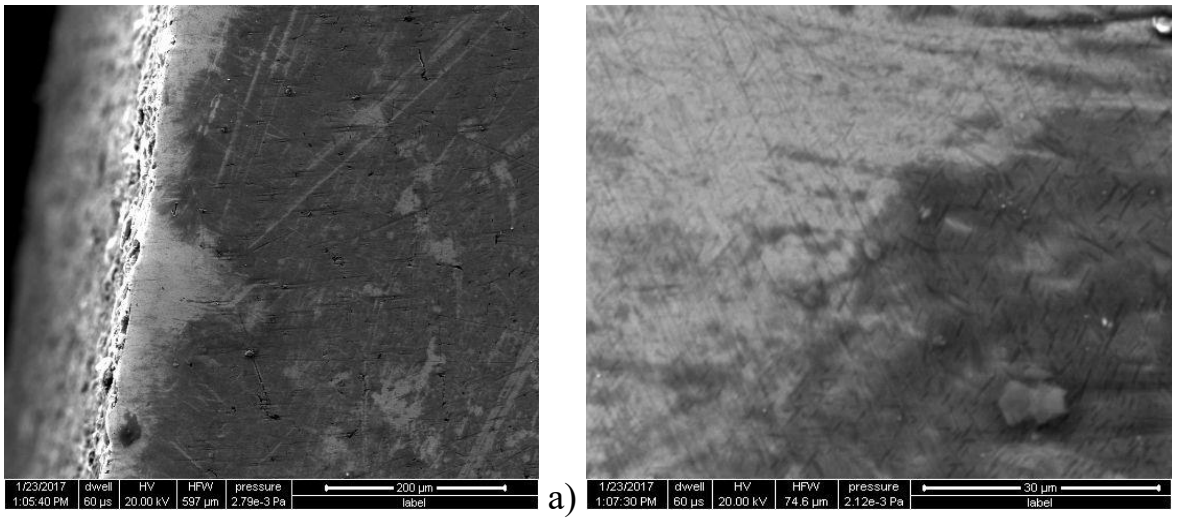


Название спектра	O	Al	Si	Ti	V	Zr	Nb	Mo	Сумма
Спектр 22	6.95	9.87	0.38	42.80	1.06	1.51	36.91	0.52	100.00
Спектр 23	8.56	9.58	0.37	42.47	1.21	1.20	36.20	0.40	100.00
Спектр 24	8.58	9.53	0.41	42.31	1.17	1.47	36.04	0.50	100.00
Спектр 25	9.28	9.32	0.41	42.14	1.25	1.42	35.51	0.68	100.00
Основа	0.0	10.5	0.16	43.32	1.3	1.2	39.50	0.7	100.00

Рисунок 7.18 – Результат микрорентгеновского спектрального анализа сплава ВТИ-4.

Таким образом, можно утверждать, что уменьшение содержания – Ti, Al, Nb в поверхностном слое обусловлено протеканием процесса окисления и образования оксидов: TiO_2(анатаз) и Al_2O_3(корунд) и образования интерметаллидов (Ti_3Al), ($NbAl_3$), Ti_2AlNb(β_2) и NbO.

Макроструктура показала, что дискретный оксидный слой, полученный диффузионным способом, имеет поликристаллическую структуру. В режиме обратно-отраженных электронов насыщаемая кислородом поверхность образца имеет тонкую оксидную пленку, (см. рисунок 7.19).



а) б)

Рисунок 7.19 – Макроструктура поверхности образца после диффузионного дискретного оксидного слоя: а) - х250; б) - х2000

Рентгеноструктурный анализ установил наличие оксидов на поверхности после упрочнения: оксид титана $TiO_2(\alpha)$ (анатаз); оксид алюминия $Al_2O_3(\alpha)$ (корунд) и интерметаллид: (Ti_3Al), ($NbAl_3$), $Ti_2AlNb(\beta_2)$ и NbO, (см. рисунок 7.20).

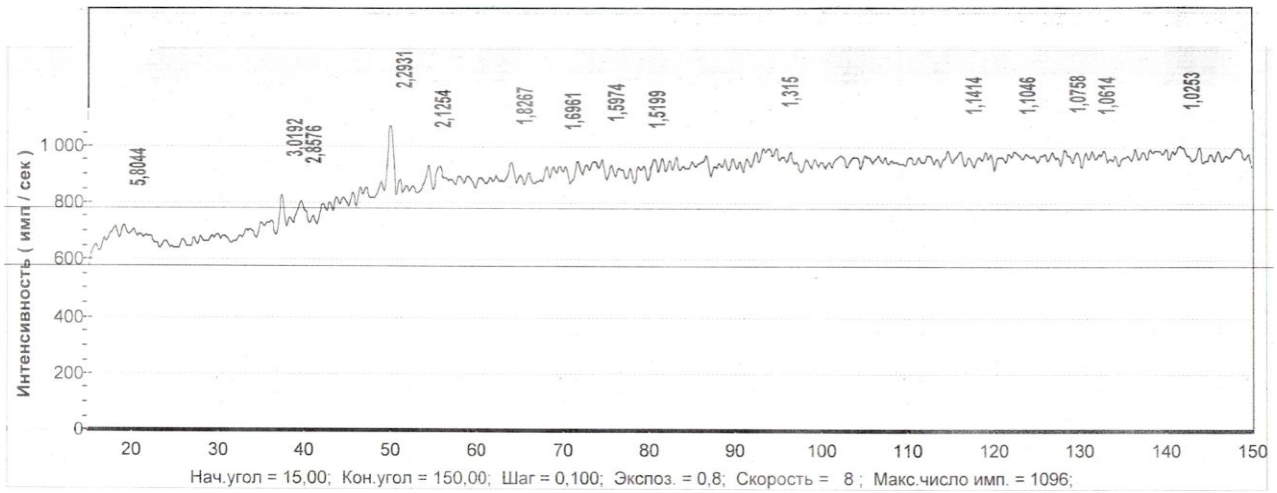


ТАБЛИЦА 2

№\(Alfa1)	Угол	Площадь	Интенс.	Полушир.	Межплск.	% Макс.	% Площ
1	19,200	206,71	126	1,5086	5,8044	35,90	43,53
2	37,400	115,04	157	0,6755	3,0192	44,73	24,22
3	39,600	240,06	133	1,6630	2,8576	37,89	50,55
4	49,939	361,41	351	0,9514	2,2931	100,00	76,10
5	51,000	156,41	168	0,8594	2,2485	47,86	32,93
6	54,187	192,88	172	1,0344	2,1254	49,00	40,61
7	55,600	474,93	208	2,1087	2,0755	59,26	100,00
8	64,000	387,14	198	1,8029	1,8267	56,41	81,52
9	69,600	363,60	193	1,7414	1,6961	54,99	76,56
10	74,600	337,81	186	1,6795	1,5974	52,99	71,13
11	79,118	121,57	128	0,8765	1,5199	36,47	25,60
12	80,600	464,00	182	2,3487	1,4966	51,85	97,70
13	94,800	367,50	183	1,8529	1,3150	52,14	77,38
14	116,000	350,13	127	2,5470	1,1414	36,18	73,72
15	122,400	185,95	116	1,4729	1,1046	33,05	39,15
16	128,255	108,85	121	0,8264	1,0758	34,47	22,92
17	131,575	294,80	81	3,3440	1,0614	23,08	62,07

а.

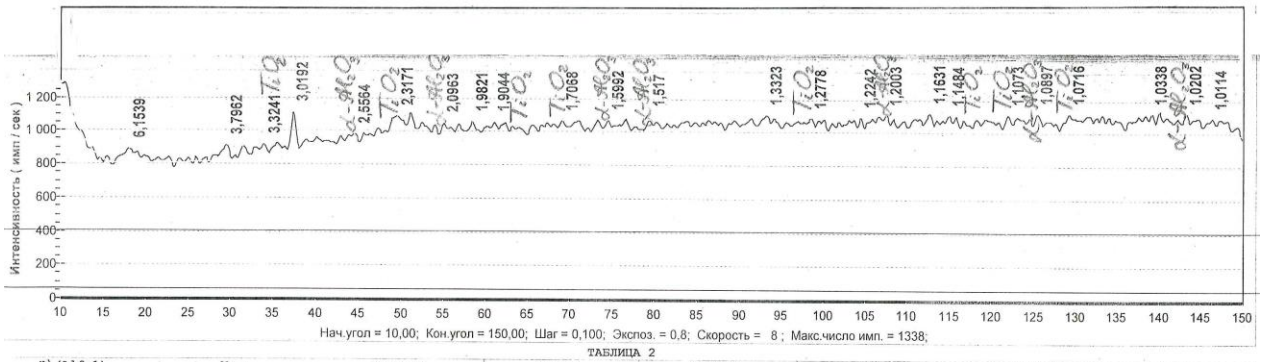


ТАБЛИЦА 2

№\(Alfal)	Угол	Площадь	Интенс.	Полушир.	Межполск.	% Макс.	% Площ
1	18,100	177,90	72	2,2780	6,1539	27,48	25,89
2	29,546	89,52	86	0,9564	3,7962	32,82	13,03
3	31,492	72,32	77	0,8701	3,5670	29,39	10,53
4	33,860	150,30	79	1,7552	3,3241	30,15	21,88
5	37,400	193,42	262	0,6805	3,0192	100,00	28,15
6	44,500	227,43	130	1,6199	2,5564	49,62	33,10
7	49,385	687,01	204	3,1062	2,3171	77,86	100,00
8	51,100	350,70	233	1,3882	2,2444	88,93	51,05
9	55,000	291,90	182	1,4803	2,0963	69,47	42,49
10	58,467	293,77	161	1,6824	1,9821	61,45	42,76
11	61,100	440,29	181	2,2484	1,9044	69,08	64,09
12	69,100	408,64	177	2,1277	1,7068	67,56	59,48
13	74,500	359,36	174	1,9014	1,5992	66,41	52,31
14	79,300	355,67	177	1,8549	1,5170	67,56	51,77
15	93,200	525,35	175	2,7775	1,3323	66,79	76,47
16	98,500	389,85	153	2,3471	1,2778	58,40	56,75
17	104,500	229,35	149	1,4237	1,2242	56,87	33,38
18	107,500	288,28	161	1,6521	1,2003	61,45	41,96
19	112,662	306,61	153	1,8498	1,1631	58,40	44,63
20	114,900	219,44	164	1,2351	1,1484	62,60	31,94
21	121,900	230,96	155	1,3735	1,1073	59,16	33,62
22	125,321	278,59	145	1,7778	1,0897	55,34	40,55
23	129,200	426,31	174	2,2576	1,0716	66,41	62,05
24	138,899	202,49	127	1,4741	1,0338	48,47	29,47
25	140,000	150,64	198	0,7027	1,0301	75,57	21,93
26	143,170	197,90	160	1,1411	1,0202	61,07	28,81
27	146,300	144,65	143	0,9335	1,0114	54,58	21,06

б.

Рисунок 7.20 – Фазовый состав образца: а- без дискретного оксидного слоя; б- с дискретным оксидным слоем.

Металлографические исследования по цветам побежалости также показали наличие оксидов: оксид титана (анатаз) $TiO_2(\alpha)$; оксид алюминия (корунд) $Al_2O_3(\alpha)$ и интерметаллиды (Ti_3Al), ($NbAl_3$), $Ti_2AlNb(\beta_2)$ и NbO, (см. рисунок 7.21). При этом структура основного сплава не претерпевает заметных изменений в поверхностном слое, поскольку процесс происходит при ионизации коронного разряда, ионы кислорода взаимодействуют с атомами сплава и образуют тонкую оксидную пленку.

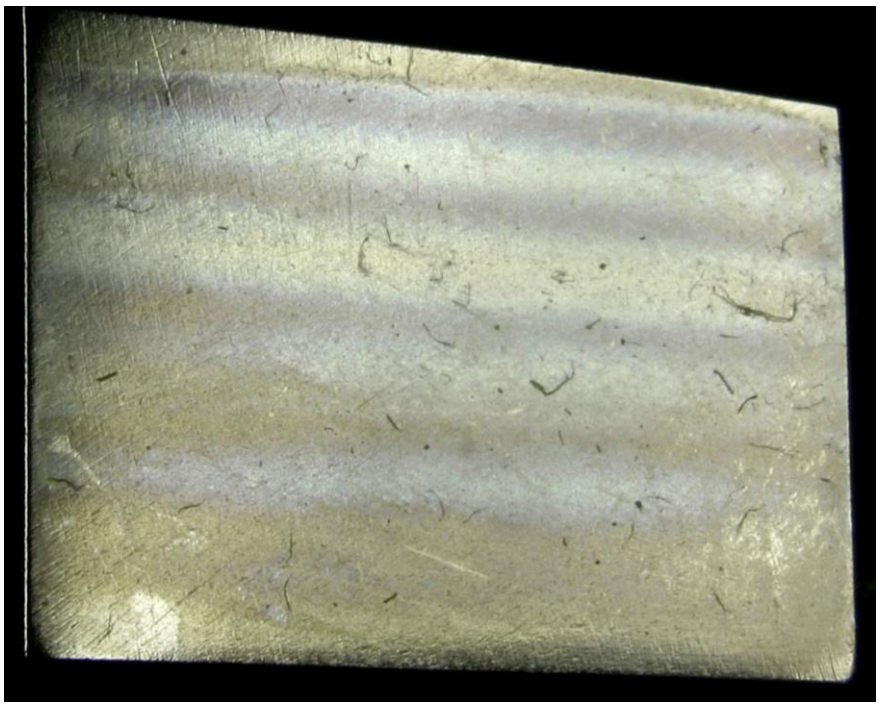
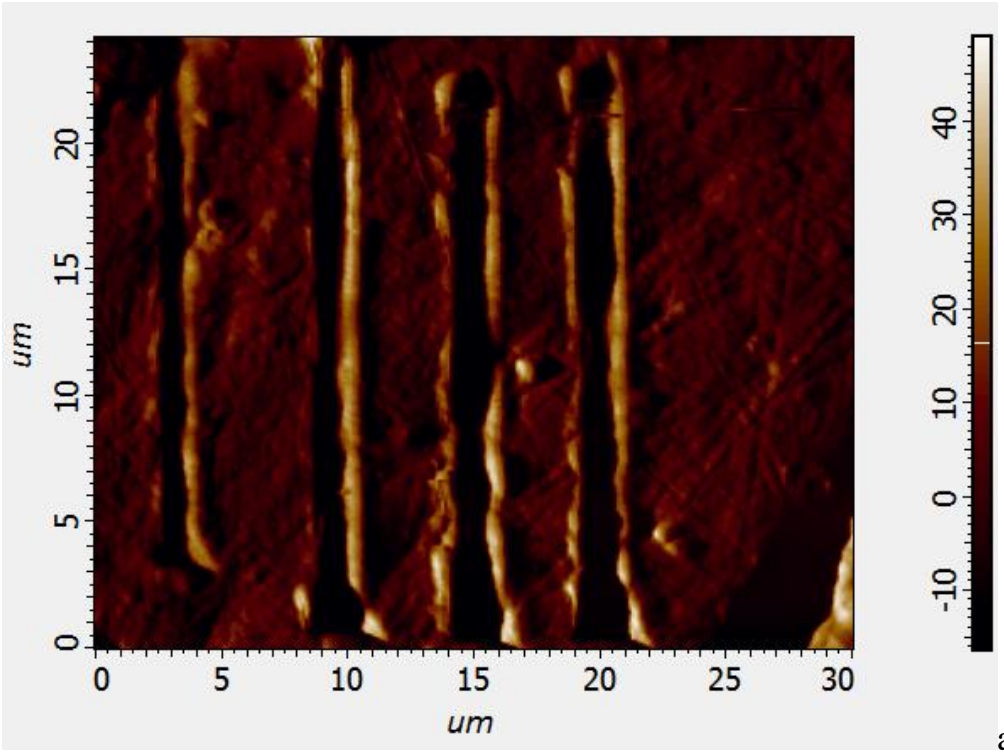


Рисунок 7.21 – Интерференция цвета побежалости на поверхности образца ВТИ-4 после диффузионного дискретного оксидного слоя

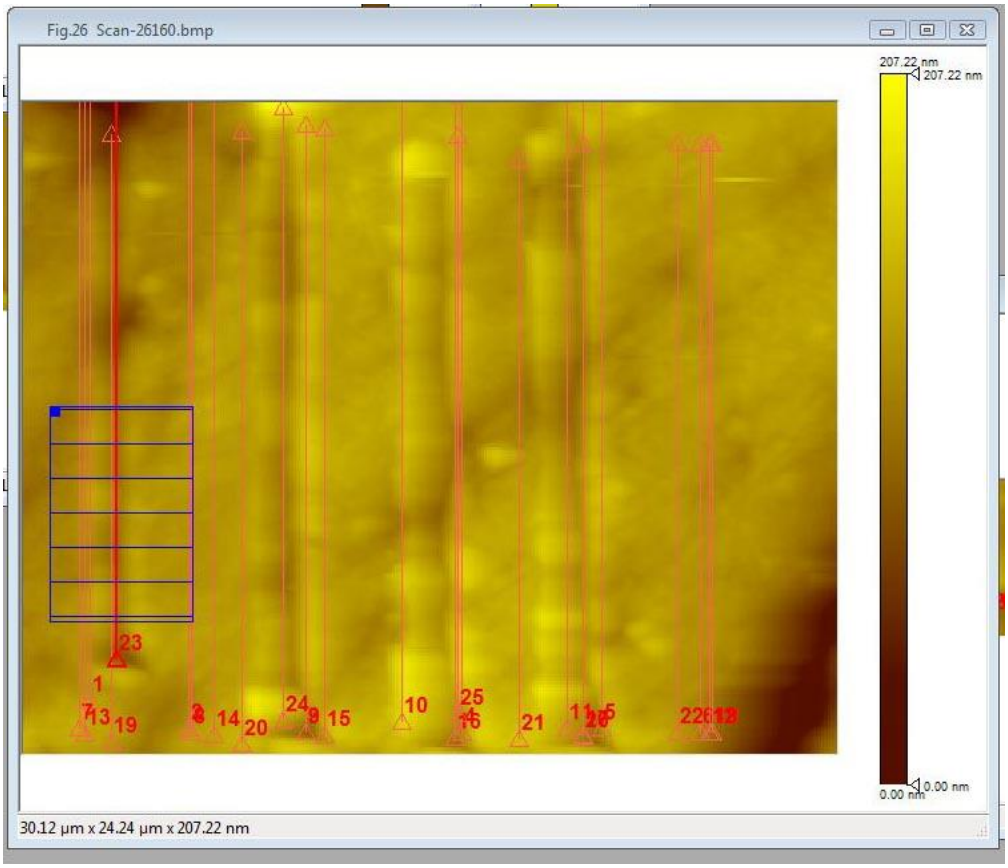
Оксид титана (анатаз) $TiO_2(\alpha)$; оксид алюминия (корунд) $Al_2O_3(\alpha)$ имеют устойчивую фазу. Интерметаллиды $Ti_3Al(\alpha_2$-фаза), $(NbAl_3)$, $Ti_2AlNb(\beta_2)$ и NbO имеют особую, упорядоченную сверхструктурную кристаллическую решетку, образование которой связано с межатомным взаимодействием компонентов при температурах ниже температуры плавления. Интерметаллид $Ti_3Al(\alpha_2$-фаза) имеет упорядоченную тетрагонально искривленную гранецентрированную структуру.

Исходная структура закаленного сплава ВТИ-4 представляла собой однофазный β(B2)-раствор с равноосными полиэдрическими зернами. Твёрдость в исходном состоянии составляла 3250 МПа, период кристаллической решетки, a_β=0,3249 нм.

Согласно исследованиям получено, что твердость образца с диффузионным дискретным оксидным слоем составляет 3650 – 4007 МПа, что на 25% выше основного материала без упрочнения, (см. рисунки 7.22-7.23).

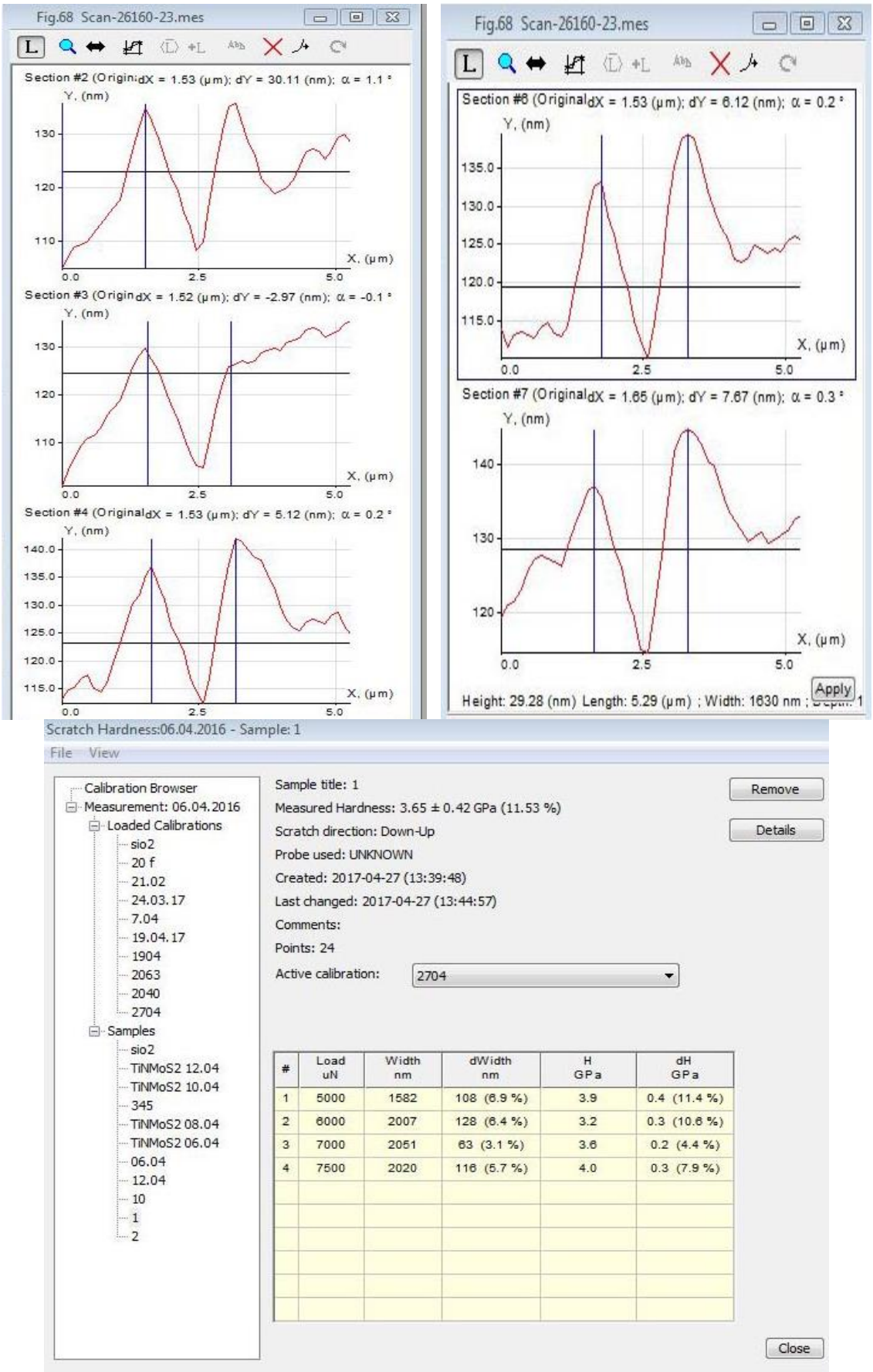


а)



б)

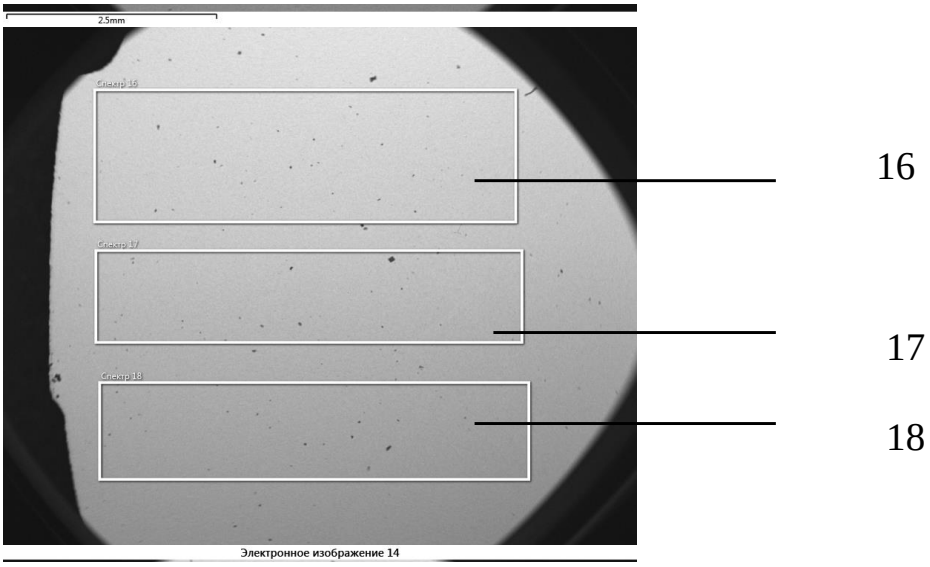
Рисунок 7.22 – Диаграмма царапания образца с диффузионным дискретным оксидным слоем: а) определение твердости в режиме склерометрии на глубине примерно 20нм; б) поперечные сечения царапины по глубине.



#	Load uN	Width nm	dWidth nm	H GPa	dH GPa
1	5000	1582	108 (6.9 %)	3.9	0.4 (11.4 %)
2	6000	2007	128 (6.4 %)	3.2	0.3 (10.6 %)
3	7000	2051	63 (3.1 %)	3.6	0.2 (4.4 %)
4	7500	2020	116 (5.7 %)	4.0	0.3 (7.9 %)

Рисунок 7.23 – Твердость образца с диффузионным дискретным оксидным слоем при разных нагрузках.

Аналогично был исследован титановый сплав ВТ-41 с диффузионным дискретным оксидным слоем. На рисунке 7.24 показана спектральная структура титановый сплав ВТ-41 с дискретным оксидным слоем, а результат химического анализа содержания элементов дискретного оксидного слоя показан в таблице.



Название спектра	O	Al	Si	Ti	Zr	Nb	Mo	Sn	W	Сумма
Спектр 16	12.62	5.27	0.47	72.33	2.98	0.98	1.17	3.66	0.52	100.00
Спектр 17	12.98	5.08	0.48	72.19	2.97	0.95	1.18	3.60	0.56	100.00
Спектр 18	11.34	5.20	0.49	73.86	2.94	0.92	1.08	3.64	0.53	100.00
Основа	0.00	6.6	0.40	82.55	3.8	1.05	1.2	3.75	0.65	100.00

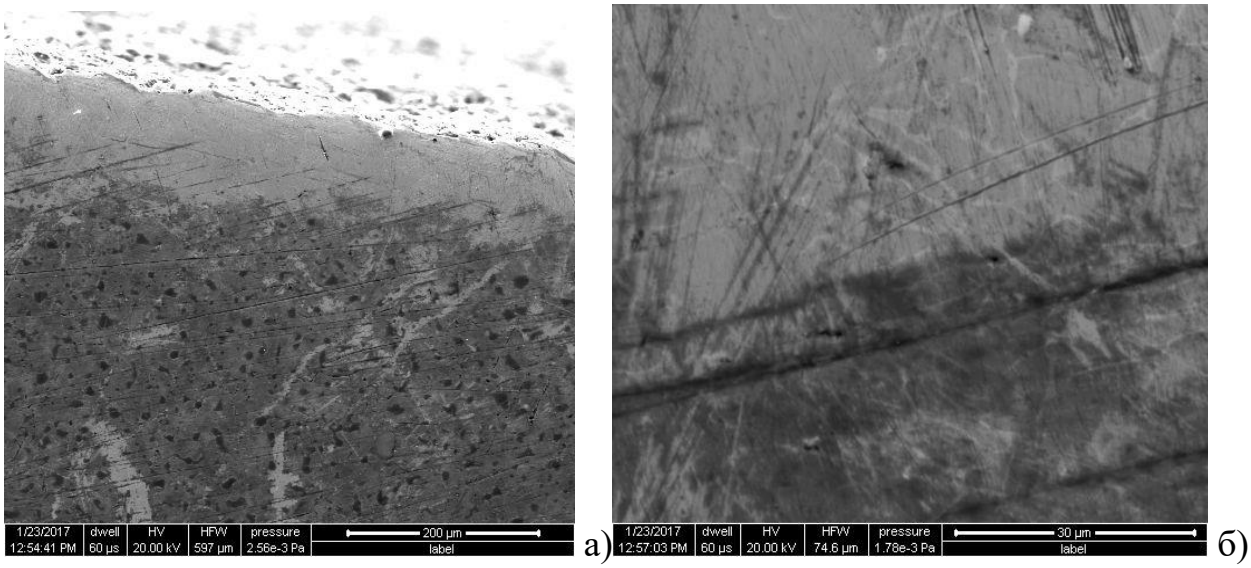
Рисунок 7.24 – Результат микрорентгеновского спектрального анализа сплава ВТ-41

Из таблицы видно, что содержание элементов Ti, Al уменьшилось, а содержание элементов Si, Zr, Nb, Mo, Sn, W практически не изменялось, в то же время установлено, что кислород присутствует в поверхностном слое и составляет, примерно 11,34-12,98%.

Таким образом, можно утверждать, что уменьшение содержания – Ti, Al, в поверхностном слое обусловлено протеканием процесса окисления и образования оксидов: Оксид титана (анатаз) $TiO_2(\alpha)$ и оксид алюминия $Al_2O_3(\gamma)$ (корунд) имеют устойчивую фазу.

Макроструктура показала, что данный дискретный оксидный слой, полученный диффузионным способом, имеет поликристаллическую

структуру. В режиме обратно-отраженных электронов насыщаемая кислородом поверхность образца имеет тонкую оксидную пленку, (см. рисунок 7.25).



а) б)

Рисунок 7.25 – Макроструктура поверхности образца ВТ-41 после диффузионного дискретного оксидного слоя: а) - х250; б) - х2000

Рентгеноструктурный анализ установил наличие оксидов на поверхности после упрочнения: оксид титана $TiO_2(\alpha)$ (анатаз) и оксид алюминия $Al_2O_3(\gamma)$ (корунд), (см. рисунок 7.26).

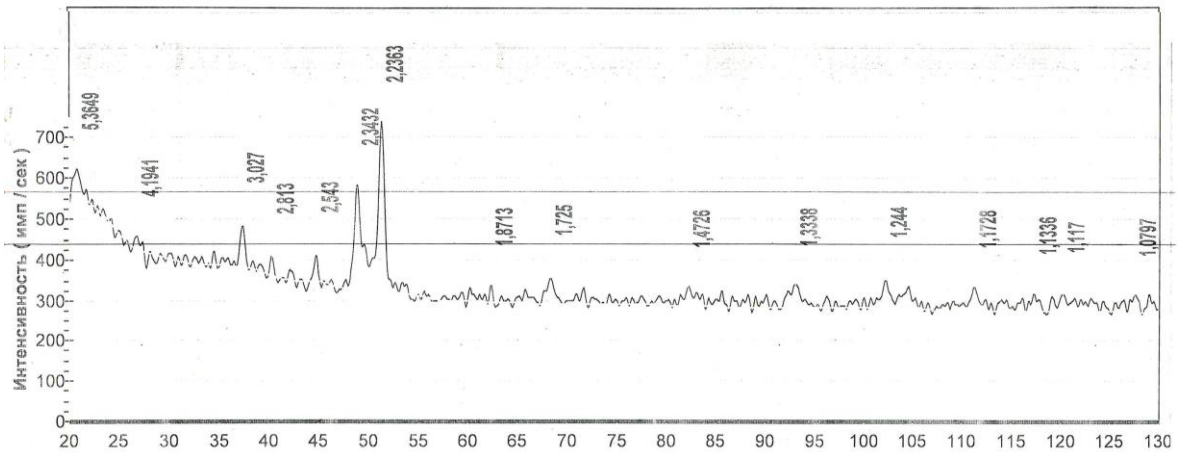
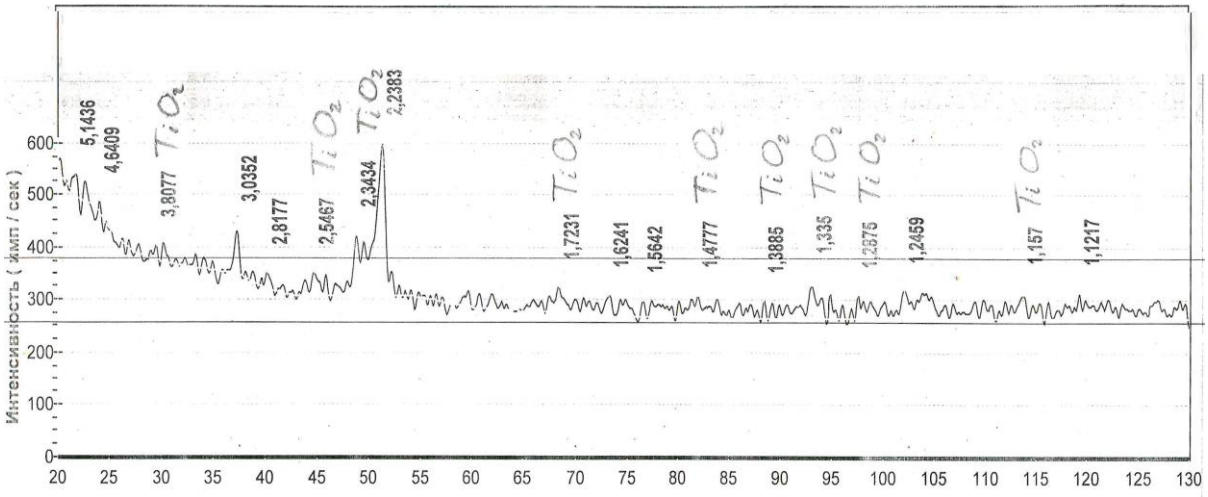


ТАБЛИЦА 2

№\(Alfa1)	Угол	Площадь	Интенс.	Полушир.	Межплоск.	% Макс.	% Площ
1	20,789	49,37	58	0,7907	5,3649	14,99	18,41
2	26,688	14,82	31	0,4362	4,1941	8,01	5,53
3	37,300	52,53	96	0,5069	3,0270	24,81	19,59
4	40,255	18,08	46	0,3659	2,8130	11,89	6,74
5	44,747	25,70	64	0,3697	2,5430	16,54	9,59
6	48,800	170,57	240	0,6554	2,3432	62,02	63,62
7	51,297	268,13	387	0,6388	2,2363	100,00	100,00
8	62,300	12,74	52	0,2239	1,8713	13,44	4,75
9	68,271	58,28	53	1,0208	1,7250	13,70	21,74
10	82,196	31,13	47	0,6085	1,4726	12,14	11,61
11	93,062	71,51	49	1,3571	1,3338	12,66	26,67
12	102,178	59,60	60	0,9208	1,2440	15,50	22,23
13	111,255	45,81	58	0,7341	1,1728	14,99	17,09
14	117,270	30,24	46	0,6040	1,1336	11,89	11,28
15	120,138	34,37	44	0,7262	1,1170	11,37	12,82
16	127,422	41,62	42	0,9050	1,0797	10,85	15,52

а.



Нач.угол = 20,00; Кон.угол = 130,00; Шаг = 0,100; Экспоз. = 0,8; Скорость = 8 ; Макс.число имп. = 616;

ТАБЛИЦА 2

№\(Alfa1)	Угол	Площадь	Интенс.	Полушир.	Межплоск.	% Макс.	% Площ
1	21,695	23,91	38	0,5838	5,1436	14,73	9,46
2	22,596	13,98	38	0,3384	4,9409	14,73	5,53
3	24,078	5,03	24	0,1895	4,6409	9,30	1,99
4	29,455	7,73	29	0,2464	3,8077	11,24	3,06
5	30,168	13,28	32	0,3847	3,7197	12,40	5,26
6	37,195	37,87	77	0,4526	3,0352	29,84	14,99
7	40,185	13,86	27	0,4727	2,8177	10,47	5,49
8	44,678	32,54	40	0,7474	2,5467	15,50	12,88
9	48,795	65,11	107	0,5626	2,3434	41,47	25,77
10	51,248	252,66	258	0,9041	2,2383	100,00	100,00
11	68,355	39,45	42	0,8566	1,7231	16,28	15,61
12	73,169	26,63	37	0,6564	1,6241	14,34	10,54
13	76,460	12,10	35	0,3171	1,5642	13,57	4,79
14	81,851	42,28	33	1,1896	1,4777	12,79	16,73
15	88,400	10,09	43	0,2181	1,3885	16,67	3,99
16	92,955	41,33	61	0,6232	1,3350	23,64	16,36
17	94,800	16,23	56	0,2663	1,3150	21,71	6,42
18	97,500	16,79	56	0,2749	1,2875	21,71	6,65
19	101,957	48,90	51	0,8902	1,2459	19,77	19,36
20	113,578	37,67	43	0,8064	1,1570	16,67	14,91
21	119,300	23,08	57	0,3707	1,1217	22,09	9,14

б.

Рисунок 7.26 – Фазовый состав образца: а- без дискретного оксидного слоя; б- с дискретным оксидным слоем.

Металлографические исследования по цветам побежалости также показали наличие оксидов: оксид титана (анатаз) $TiO_2(\alpha)$ и оксид алюминия $Al_2O_3(\gamma)$ (корунд), (см. рисунок 7.27). При этом структура основного сплава не претерпевает заметных изменений в поверхностном слое, поскольку процесс происходит при ионизации коронного разряда, ионы кислорода взаимодействуют с атомами сплава и образуют тонкую оксидную пленку.

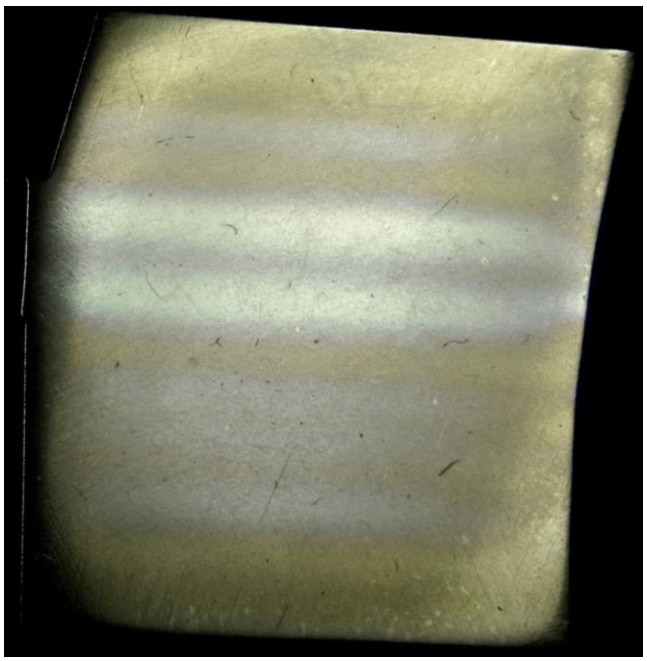


Рисунок 7.27 – Интерференция цвета побежалости на поверхности образца ВТ-41 после диффузионного дискретного оксидного слоя

Металлографические исследования титанового сплава ВТ3–1 с диффузионным дискретным оксидным слоем были отражены в гл. 5. Поскольку основными повреждающими факторами для лопаток компрессора является изнашивание входных кромок, то были рассмотрены и механические свойства образцов лопаток из титанового сплава ВТ3–1 с диффузионным дискретным оксидным слоем, а также образцов со сплошным покрытием (AlBN-SiO_2) и образцов без упрочнения. Исследования были проведены на предел прочности и текучести $\sigma_{0,2}$, $\sigma_в$ на растяжение и на усталостную прочность σ_{-1} в соответствии с методикой АО «НПЦ газотурбостроения «Салют».

Определялся предел прочности при растяжении и статистические параметры (абсолютное отклонение S, и относительное отклонение γ).

Результаты исследований представлены в таблице 7.4, а обобщенные результаты приведены в виде диаграммы на рисунке 7.28.

Таблица 7.4 – Предел прочности и текучести образцов из титанового сплава ВТ3 – 1 на растяжение

№ пп.	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	$(\sigma \pm S)$, МПа, γ, %	№ пп.	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	$(\bar{\sigma} \pm S)$, МПа, γ, %
ВТ3-1	1042	1091,4	21,4	ВТ3-1 –сплошное покрытие	1027	1072,5	19,8
ВТ3-1	1069	1116,0	18,4	ВТ3-1 – дискретный оксидный слой	1073	1106,8	17,1
ВТ3-1	1073	1108,4	17,5	ВТ3-1- дискретный оксидный слой	1050	1082,0	16,1
ВТ3-1 – сплошное покрытие	1024	1052,4	18,0	ВТ3-1 – дискретный оксидный слой	1049,8	1092,5	16,6
Т3-1 – сплошное покрытие	1043	1074,3	20,3				

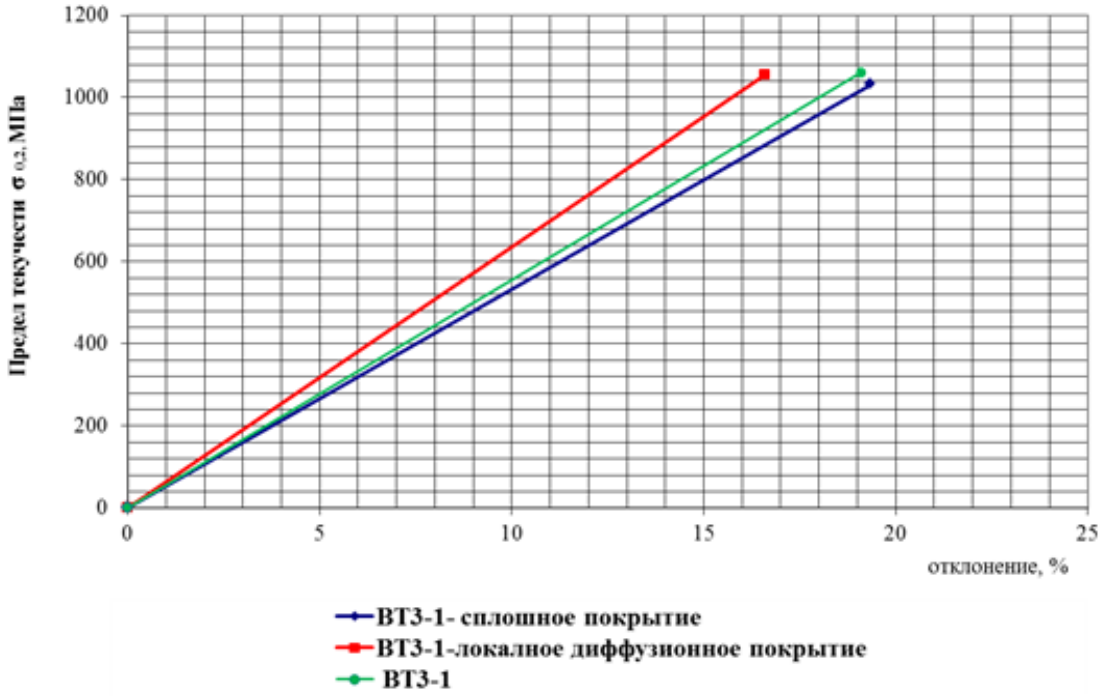


Рисунок 7.28 – Предел текучести $\sigma_{0,2}$, образца из титанового сплава ВТ3–1 при растяжении

Механическими испытаниями на предел прочности при растяжении установлено, что образец с диффузионным дискретным оксидным слоем увеличивает прочность на 98,46 %, а образец со сплошным покрытием на 97,1%.

Из выше полученных результатов установлено, что диффузионный дискретный оксидный слой и сплошное покрытие практически не оказывают заметного влияния на временное сопротивление и предел текучести титанового сплава.

7.3 Усталостные испытания образцов из титанового сплава с диффузионным дискретным оксидным слоем

За критерий разрушения образца принимали изменение частоты колебаний на 1 - 10 % в зависимости от условий испытаний. При этом испытания прекращали, и образец подвергали контролю для установления наличия трещины. При отсутствии трещины испытания продолжали. Результаты испытаний заносили в протокол по установленной стандартом форме.

После обработки результатов испытаний для построения кривых усталости и определения предела выносливости, а также установления количественной зависимости характеристик усталости от различных технологических конструкционных или эксплуатационных факторов, исходные данные и результаты каждого испытания фиксировали в протоколе испытаний, а результаты серии испытаний в сводном протоколе по установленной, стандартом форме.

Чертеж образца для проведения усталостных испытаний приведен на рисунке 7.29.

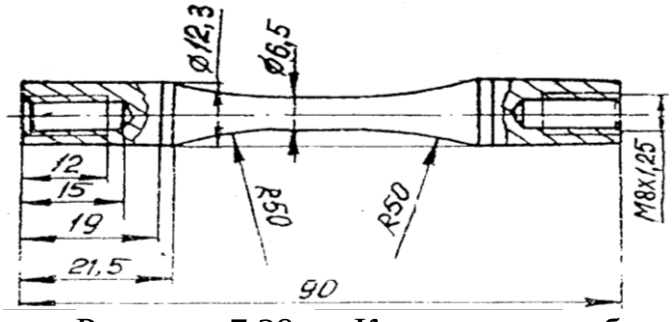


Рисунок 7.29 – Конструкция образца для испытания на усталостную прочность

Рабочая поверхность образца для испытаний на усталость была получена при различных условиях обработки:

– образец со сплошным покрытием;

– образец с диффузионным дискретным оксидным слоем;

– образец не упрочненный.

Усталостное разрушение представляет собой прогрессивное развитие трещины; естественно, что образование трещины, и особенно ее дальнейшее развитие, затрудняется при действии сжимающих напряжений.

Испытания на усталость проводили при нормальной температуре при резонансных колебаниях, согласно методики АО «НПЦГ «Салют», уровень нагружения задавали по σ_{max}.

Каждый образец испытывали только при одном уровне напряжений до разрушения, т.е. до максимального числа циклов, (см. таблицу 7.5).

Таблица 7.5 – Влияние видов покрытий на усталостную прочность титанового сплава ВТ3-1. Частота f = 1Гц, t= 20°С, σ = 1000 МПа

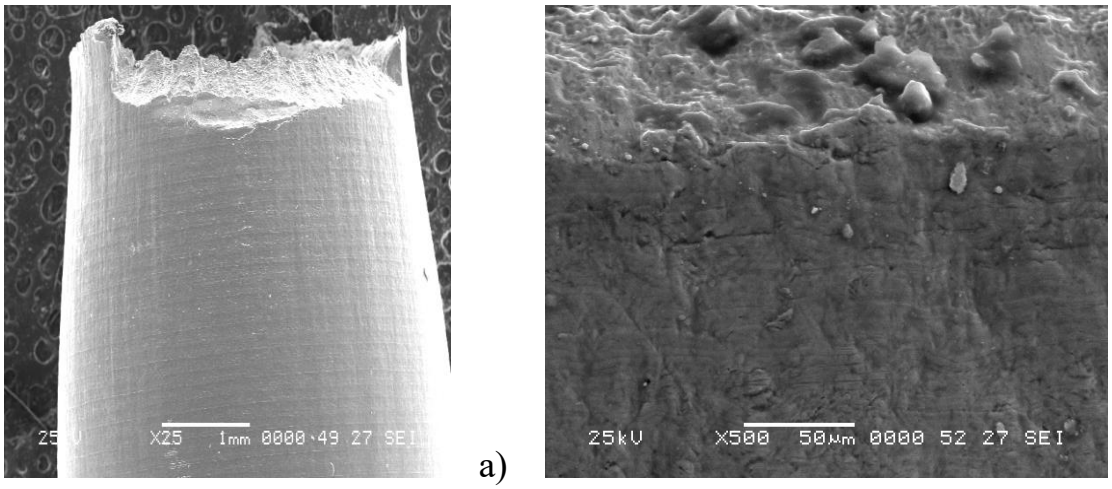
№ образцов	ВИД покрытия	Количество циклов
1	ВТ3-1 – без покрытий	11 841
2	ВТ3-1 – без покрытий	11 849
3	ВТ3-1 без покрытий	9 248
1	ВТ3-1 – сплошное покрытие	2 881
2	ВТ3-1 – сплошное покрытие	3 663
3	ВТ3-1 – сплошное покрытие	3 663
1	ВТ3-1 – дискретный оксидный слой	16 249
2	ВТ3-1 – дискретный оксидный слой	13 096
3	ВТ3-1 – дискретный оксидный слой	11 018

На рисунке 7.30 показана гистограмма усталостных испытаний образцов из титанового сплава ВТ3–1 с диффузионным дискретным оксидным слоем, со сплошным покрытием (AlBN-SiO_2) и сравнивались с контрольной партией

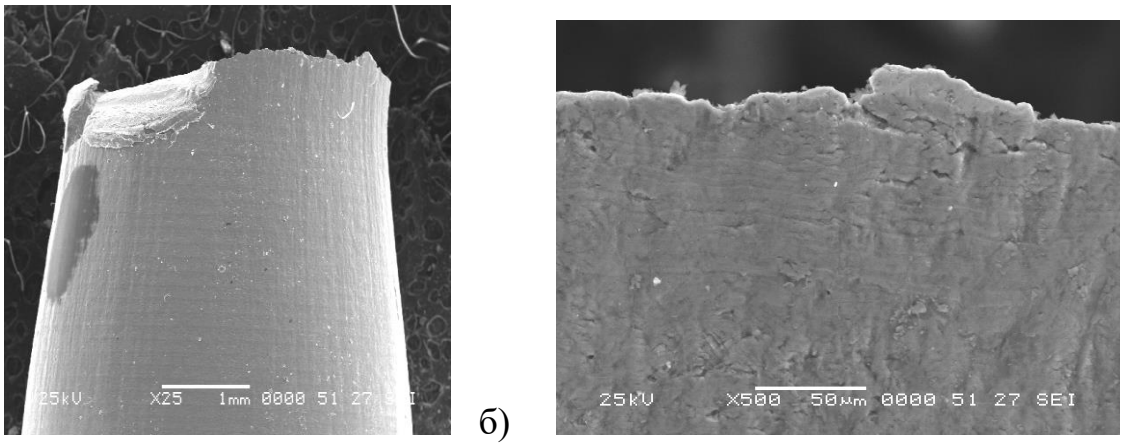
образцов без покрытия при прикладываемой нагрузке σ = 1000МПа, при этом продолжительность цикла составляла 10^6.

Рисунок 7.30 – Гистограмма усталостных испытаний образцов из титанового сплава ВТ3-1 при нагрузке σ = 1000МПа

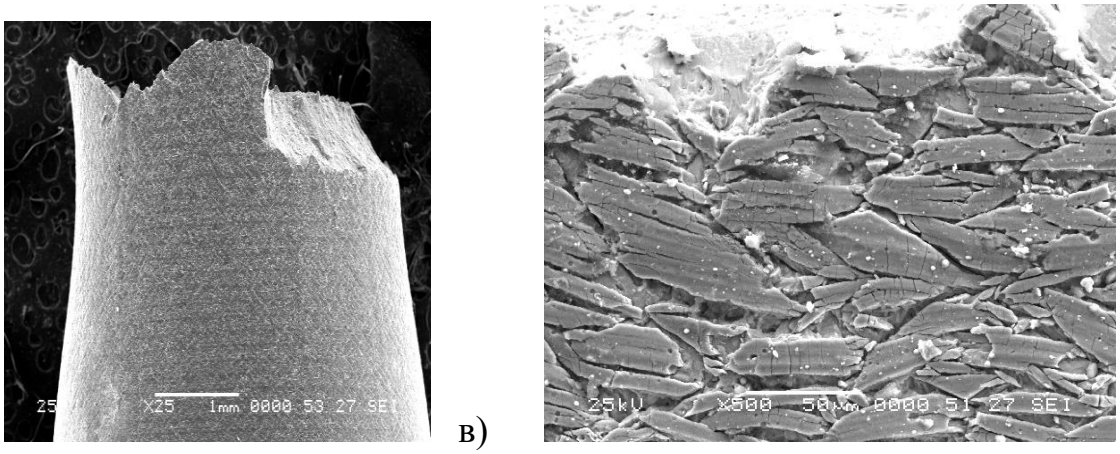
В результате испытания на усталость показали, что усталостная прочность образцов с дискретным оксидным слоем на 30% выше, чем у образцов со сплошным покрытием и на 25% выше, чем у контрольных образцов без покрытий, (см. рисунок 7.30). Исследования поверхностей разрушения показали, что структура дискретного оксидного слоя препятствует распространению трещин в процессе эксплуатации на границе раздела с материалом, (см. рисунок 7.31). Рост прочностных свойств, при небольших степенях деформации $\varepsilon_{ост}$, обусловлен неоднородностью распределения дефектов решетки по объему. В то же время с ростом $\varepsilon_{ост}$ пластичность металла сохраняется, повышается его чувствительность к перегрузкам, уменьшается трещиностойкость, рисунок 7.31, б).



а)



б)



в)

Рисунок 7.31 – Влияние покрытий на особенности разрушения при усталостных испытаниях образцов из сплава ВТ3-1 с покрытиями и без: а) со сплошным покрытием AlBN-SiO_2; б) с локальным диффузионным дискретным оксидным слоем; в) без покрытия.

7.4 Промышленная реализация результатов исследований инструментального материала с диффузионным дискретным оксидным слоем

Для увеличения производительности инструмента, в покрытие включают легирующие элементы: Zr, Mo, Al и др. в виде мягких прослоек, которые влияют на структуру и физико-механические свойства покрытий. Такое неоднозначное изменение связано с разным влиянием химических элементов на снижение напряжений, действующих в инструментальной основе.

Таким образом, для повышения износостойкости режущего инструмента с покрытием и уменьшения преждевременного износа, можно использовать эффект неравномерности покрытия, т.е. нанесение покрытия диффузионным дискретным методом, где в качестве мягких прослоек используется исходный материал.

Благодаря своей поликристаллической структуры инструментальный материал имеет повышенную твердость, износостойкость.

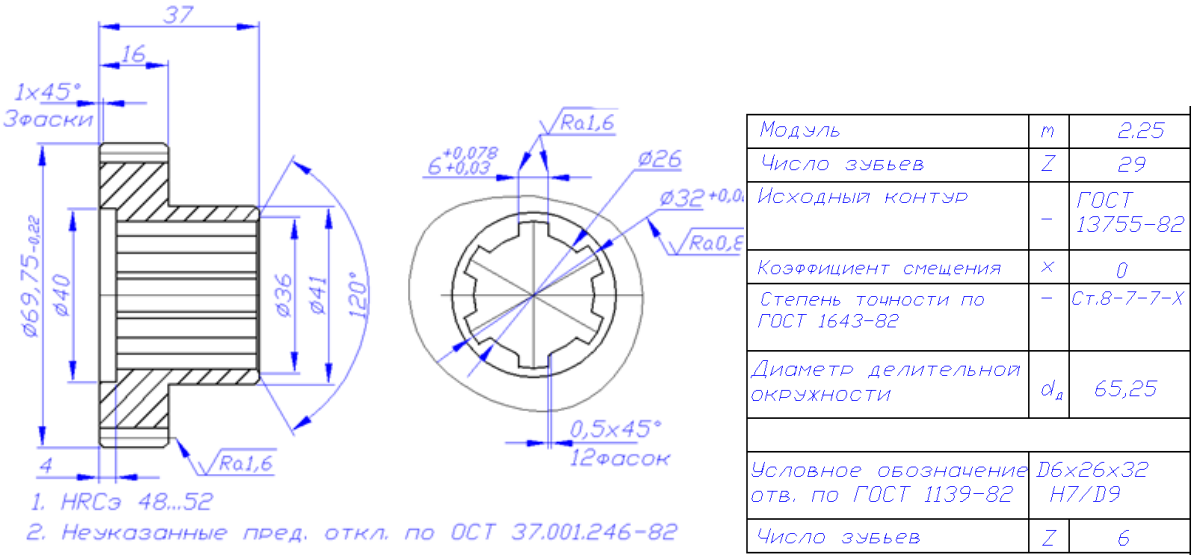
К настоящему времени оксидное диффузионное упрочнение прошло путь от общей идеи до её практической реализации и подтверждения реального эффекта повышения износостойкости (долговечности) деталей машин и инструмента. В том числе обоснована физико-механическая модель работы такого дискретного покрытия; разработаны физико-химическая модель и технология его формирования на поверхности металлического материала. Проведено всестороннее экспериментальное опробование новой технологии, установлены параметры процесса, обеспечивающие наиболее высокую износостойкость и долговечность режущего инструмента в условиях эксплуатации.

Внедрение разработанной технологии по упрочнению сложнопрофильного режущего инструмента проводилось на предприятии АО «МПО им. И. Румянцева» (г. Москва).

На предприятии имеется специализированное оборудование для

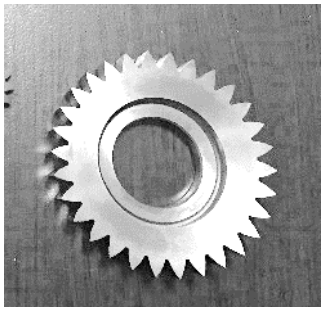
обработки деталей специализированным быстрорежущим инструментом из быстрорежущей стали.

Учитывая специфику предприятия, предложенная технология позволяет упрочнять инструмент, изготовленный самим производством. Согласно договору №РЗ-07/02/04Р/0404-18 от 10.09.2018г. с АО «МПО им. И. Румянцева» для обработки шестерни из стали 16Х3НВФБМ-Ш был упрочнен быстрорежущий долбяк из стали Р18, (см. рисунок 7.32-7.33). Испытания проводили на чистовом режиме с использованием СОЖ (TRIM E708): V = 150 дв.х/мин, $S_м$ = 235 мм/мин, S_z = 0,01 мм/дв.х.; t = 0,10мм, где дв.х=36мм.



Модуль	m	2,25
Число зубьев	Z	29
Исходный контур	–	ГОСТ 13755-82
Коэффициент смещения	x	0
Степень точности по ГОСТ 1643-82	–	Ст.8-7-7-Х
Диаметр делительной окружности	$d_д$	65,25
Условное обозначение отв. по ГОСТ 1139-82	D6x26x32 H7/D9	
Число зубьев	Z	6

Рисунок 7.32 – Чертеж шестерни из стали 16Х3НВФБМ-Ш


а

б

Рисунок 7.33 – Быстрорежущий долбяк из стали Р18: а – без упрочнения; б – с диффузионным дискретным оксидным слоем

Критерием затупления служил износ по задней поверхности зуба инструмента. Анализ сравнительных результатов исследований показан на рисунке 7.34.

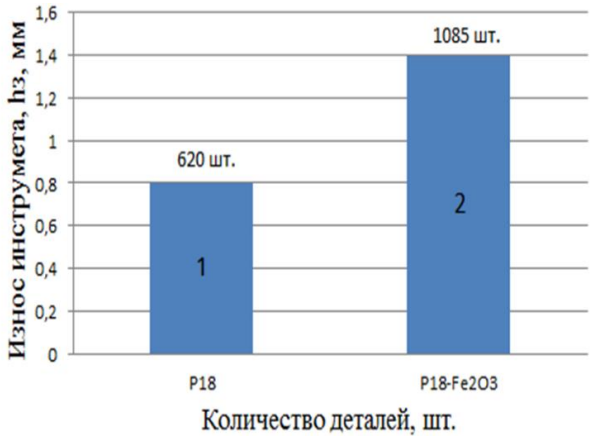


Рисунок 7.34 – Работоспособность быстрорежущих долбяков Р18 при черновом зубодолблении детали из стали 16Х3НВФБМ-Ш: v = 140 дв.х./мин; t = 1,5 мм; $s_{кр}$ = 0,080 мм/дв.х.; 1 – долбяк без покрытия; 2 – долбяк с диффузионным дискретным оксидным слоем.

Проведенные сравнительные испытания показали, что технология нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя на сложнопрофильный режущий инструмент позволяет повысить износостойкость быстрорежущего долбяка из Р18 при зубодолблении стали 16Х3НВФБМ-Ш в 1,5-1,7 раз по сравнению со стойкостью контрольных долбяков. Это позволяет увеличить срок службы деталей как минимум в 2…3 раза.

Расчет ожидаемого годового экономического эффекта от внедрения детали «шестерни» проводился в соответствии с «Методикой определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений», (см. рисунок 7.35).

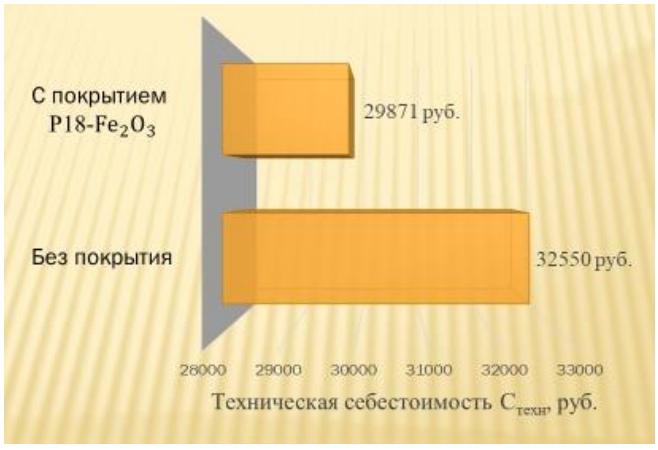


Рисунок 7.35 – Экономическая эффективность от использования долбяка из быстрорежущей стали

Таким образом, экономический эффект от использования долбяка из быстрорежущей стали с диффузионным дискретным оксидным слоем Р18-Fe_2O_3 составил не менее 3000 руб.

Разработанная технология может быть применена в двигателестроительной, машиностроительной, авиастроительной и других отраслях промышленности с ожидаемым экономическим эффектом не менее 40,0 млн. рублей.

Выводы по главе:

1. Установлено, что карбидное покрытие ВК-25М содержит (3-4)%С, (72-74)% вольфрама и (23-24)% кобальта, не растрескивается под нагрузкой при толщине слоя примерно 0,26 - 0,28 мм, но после напыления данное покрытие ВК-25М вновь направляют на механическую обработку для окончательного изготовления лопатки под размер и на дискретное диффузионное упрочнение .

2. Разработан способ повышения долговечности лопаток компрессора на второй ресурс путем восстановления износостойкого покрытия ВК-25М на антивибрационных бандажных полках.

3. Структура диффузионного дискретного оксидного слоя препятствует распространению трещин и даже их остановки в процессе эксплуатации на границе раздела материал – покрытие, кроме того, дискретный оксидный слой не требует дополнительной механической обработки, что позволяет увеличивать ресурс лопаток.

4. Механические испытания показали, что разработанная технология диффузионного дискретного оксидного слоя позволяет увеличить длительную пластичность и повысить циклическую долговечность на 30 - 50% деталей из титановых сплавов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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 Uэф;

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верещака, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака. – М.: Машиностроение, 1993. – 330 с.

2. Чекалова, Е.А. 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.

3. Горелов, В.А. Исследование влияния округления режущей кромки на температуры и силы резания при точении титановых сплавов / В.А. Горелов, В.С. Кушнер // Резание и инструмент в технологических системах: меж. науч.- тех. сборник. – Харьков, 2003. – С. 43 – 46.

4. Горелов, В.А. Влияние условий термомеханического нагружения на напряжения и деформации режущего лезвия / В.А. Горелов, В.С. Кушнер // Справочник. Инженерный журнал. – 2005. – №8. – С. 51 – 53.

5. Васин, С.А. Резание материалов: термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учебник для технических вузов / С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с.

6. Горелов, В.А. Термомеханический анализ обработки резанием жаропрочных сплавов / В.А. Горелов // Омский научный вестник, 2006. – №10. – С. 24 – 28.

7. Верещака, А.С. Повышение работоспособности режущих инструментов нанесением износостойких покрытий: дис. д-ра тех. наук: 05.03.01/ Верещака Анатолий Степанович. – М., 1986. – 520 с.

8. Григорьев, С.Н. Повышение работоспособности инструмента из быстрорежущей стали путем КПО: дис. канд. тех. наук: 05.03.01/ Григорьев Сергей Николаевич. – М., 1988. – 188 с.

9. Касьянов, С.В. Исследование режущих свойств и разработка путей дальнейшего развития инструментов с износостойкими покрытиями: дис.

канд. тех. наук: 05.03.01/ Касьянов Станислав Вячеславович – М., 1979. – 241 с.

10. Синопальников, В.А. Затупление быстрорежущего инструмента и способы повышения его работоспособности / В.А. Синопальников // Материалы семинара. Обработка конструкционных материалов резанием с применением СОЖ. – М.: МДНТП, 1978. – С. 62 – 67.

11. Хает, Л.Г. Прочность режущего инструмента / Л.Г. Хает. – М.: Машиностроение, 1975. – 168 с.

12. Лоладзе, Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.

13. Артингер, И. Инструментальные стали и их термическая обработка: справочник /И. Артингер. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.

14. Бетанели, А.И. Прочность и надежность режущего инструмента /. А.И. Бетанели. – Сброте Сакартвело. – Тбилиси: 1973. – 304 с.

15. Верещака, А.С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями /А.С. Верещака, И.П. Третьяков. – М.: Машиностроение, 1986. – 190 с.

16. Кабалдин, Ю.Г. Структурно энергетический подход к процессу изнашивания режущего инструмента / Ю.Г. Кабалдин // Вестник машиностроения. – 1990. – № 12. – С. 62 – 68.

17. Кузьменко, Ю.Н. Повышение качества режущего инструмента из быстрорежущей стали / Ю.Н. Кузьменко, В.М. Рябикина и др. // Бюллетень. ЦНИИЧМ. Черметинформаця. – 1987. – №17. – С. 12 – 24.

18. Anschutr, E. Fortschritte in der spanenden Fertigngstechnik / E. Anschutr // Tr fur metal bearbeitung. – 1988. – Vol. 82. – №3. – p.7 – 12.

19. Внуков, Ю.Н. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Ю.Н. Внуков. – Киев: Изд-во «Техника», 1992. – 144 с.

20. Остафьев, В.А. Расчет динамической прочности режущего инструмента / В.А. Остафьев. – М.: Машиностроение, 1979. – 168 с.

21. Чекалова, Е.А. 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.

22. Чекалова, Е.А. 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.

23.Чекалова, Е.А. 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.

24. Чекалова, Е.А. Азотирование в плазме несамостоятельного газового разряда – метод повышения эффективности инструмента из быстрорежущей стали / Е.А. Чекалова // Сб. трудов научного симпозиума «Интерпартнер – 2001». – Харьков. НТУ «ХПИ». – 2001. – С. 223 – 227.

25. Чекалова, Е.А. 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.

26. Чекалова, Е.А. Азотирование в плазме несамостоятельного газового разряда – метод улучшения экологии и повышение 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.

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

28. Григорьянц, А.Г. Лазерная техника и технология в 7 кн.: 6 кн. Основы лазерного термоупрочнения / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов. – М.: Высшая школа, 1988. – 159 с.

29.Чекалова, Е.А. 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.

30. Внуков, Ю.Н. Повышение износостойкости быстрорежущих инструментов на основе исследования условий их трения с обрабатываемым материалом и реализации новых технологических возможностей: дис. д-ра тех. наук: 05.03.01/ Внуков Юрий Николаевич. – М., 1992. – 301 с.

31. Подураев, В.Н. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии / В. Н. Подураев, А. А. Барзов, В. А. Горелов. – М.: Машиностроение, 1988. – 54 с.

32. Подураев, В. Н. Стойкость инструмента при прерывистом резании / В. Н. Подураев, В. М. Ярославцев // Станки и инструмент. – 1969. – №10. – С. 25–28.

33. Вульф, А. М. Резание металлов / А. М Вульф. – Л.: Машиностроение, 1973. – 406 с.

34. Грановский, Г. И. О методике измерения и критерии износа режущих инструментов / Г. И Грановский // Вестник машиностроения. 1963. – № 9. – С. 45 – 51.

35. Грановский, Г. И. Резание металлов: учебник для машиностроения и приборостроения специализированных вузах / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.

36. Astakhov, V. The assessment of cutting tool wear / V Astakhov // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2004. – № 44. – p. 637 – 647.

37. Макаров, А. Д. Износ и стойкость режущих инструментов / А. Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1966. – 264 с.

38. Макаров, А. Д. Методика ускоренных стойкостных испытаний инструмента при резании / А. Д. Макаров // Труды Рыбинского авиационно-технического института. 1975. – № 3. – С. 178-183.

39. Кондратов, А. С. Параметры системы СПИД и технологические условия максимальной технико-экономической производительности обработки деталей на станках токарной группы / А. С Кондратов // Методические материалы НИАТ. 1981. – 48 с.

40. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский –2-е. изд. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.

41. Постнов, В. В. Процессы на контактных поверхностях, износ режущего инструмента и свойства обработанной поверхности / В. В.

Постнов, Б. У. Шаринов, Л. Ш. Шустер. – Свердловск, Изд-во Уральского ун-та, 1988. – 224 с.

42. Шустер, Л. Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел / Л. Ш. Шустер – Уфа: Гилем, 1999. – 199 с.

43. Макаров, А. Д. Оптимизация процесса резания / А. Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

44. Армарего, И. Обработка металлов резанием / И. Армарего, Р. Х. Браун. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.

45. Креймер, Г.С. Прочность твердых сплавов / Г. С. Креймер. – М.: Металлургия, 1971. – 248 с.

46. Третьяков, В. И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов / В. И. Третьяков. – М.: Металлургия, 1976. – 528 с.

47. Туманов, В. И. Свойства сплавов системы карбид вольфрама – кобальт / В. И Туманов. – М.: Металлургия, 1971. – 95 с.

48. Лошак, М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов / М.Г. Лошак. – Киев: Наукова думка, 1984. – 328 с.

49. Остафьев, В. А. Расчет динамической прочности режущего инструмента / В. А. Остафьев – М.: Машиностроение, 1979. – 168 с.

50. Иванова, В. С. Природа усталости металлов / В. С. Иванова, В. Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.

51. Регель, В. Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 535 с.

52. Новиков, И. И. Физическая механика реальных материалов / И. И. Новиков, В. А. Ермишкин. – М.: Наука, 2004. – 310 с.

53. Чекалова, Е. А. 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.

54. Барзов, А. А. Эмиссионная технологическая диагностика / А. А. Барзов. – М.: – Машиностроение, 2005. – 384 с.

55. Бабичев, А. П. Физические величины: справочник / А. П. Бабичев. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 217 с.

56. Арзамасов, Б. Н. Справочник по конструкционным материалам / Б. Н. Арзамасов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 230 с.

57. Кудинов, В. В. Нанесение покрытий напылением: теория, технология и оборудование / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров. – М.: Металлургия, 1992. – 304 с.

58. Волков, А. И. Справочник по общей и неорганической химии / А. И. Волков, И. М. Жарский. – Минск: Букмастер, 2013. – 224 с.

59. Рейзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю.П. Рейзер. – Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2009. – 736 с.

60. Бортник, И. М. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учебник для вузов / И. М. Бортник; под общ. ред. И. П. Верещагина. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 704 с.

61. Лахтин, Ю.М. Химико-термическая обработка металлов: учебное пособие для вузов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М.: Высшая школа, 1985. – 256 с.

62. Зуев, Л.Б. Физика прочности и экспериментальная механика: учебное пособие / Л. Б Зуев, С.А. Баранникова. – Новосибирск: Наука, 2011. – 350 с.

63.Николаев, Л.А. Физическая химия / Л. А. Николаев, В. А. Тулупов. – М.: Высшая школа. 1967. – 466 с.

64. Арзамасов, Б.Н. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б.Н. Арзамасов, А.Г. Братухин, Ю.С. Елисеев, Т.А. Панайоти. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 400 с.

65. Бокштейн, Б.С. Диффузия в металлах: учебное пособие / Б. С. Бокштейн. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.

66. Готтштайн, Г. Физико-химические основы материаловедения: учебное пособие / Г. Готтштайн. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 400 с.

67. Леб, Л. Основные процессы электрических разрядов в газах / Л. Леб. –М. – Л.: Государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1950. – 211 с.

68. Капцов, Н. А. Коронный разряд и его применение в электрофильтрах / Н. А. Капцов. – М.: Библиотека ХНЦ центральное хранилище основной фонд, 1947. – 157 с.

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

70. Топалова, О.В. Химия окружающей среды: учебное пособие /О.В. Топалова, Л.А. Пимнева. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013. – 160 с.

71. Глинка, Н.Л. Общая химия / Н.Л. Глинка. – М.: Изд-во «Юрайт», 2013. – 900 с.

72. Некрасов, Б.В. Основы общей химии / Б.В. Некрасов. – М.: Изд-во «Химия», 1973. – 1т. 656 с.

73. Чекалова, Е. А. Устройство для получения озонированного воздуха при резании / Е. А. Чекалова, В. Д. Гурин // Патент 2279962 РФ на изобретение, МПК B23Q011/10/ Опубликовано 20. 07. 2006г. Патентообладатель: Чекалова Е. А. Приоритет изобретения 06.12.2004г.

74. Егоров, В.К. Ионнопучковые методы неразрушающего количественного контроля наноструктур / В. К. Егоров, Е. В Егоров // Сб. трудов: X Международной конференции «Высокие технологии промышленности России». – М.: Техномаш. – 2004. – С. 82 – 103.

75. Деревлев, П.С. Исследования работоспособности металлорежущего инструмента с тонкими покрытиями в условиях прерывистого резания: дис. канд. тех. наук: 05.03.01/ Деревлев Петр Степанович. – М., 1978. – 310 с.

76. Самсонов, Г.В. Физико-химические свойства окислов. Справочник / Г.В. Самсонов, А.Л. Борисова, Т.Г. Жидкова и др. – М.: Изд-во «Металлургия», 1978. – 472 с.

77. Мень, А.Н. Физико-химические свойства нестехиометрических окислов / А.Н. Мень, Ю.П. Воробьев, Г.И. Чуфаров. – Л.: Изд-во «Химия», 1973. – 224 с.

78. Рабинович, В.А. Краткий химические справочник / В.А. Рабинович, З.Я. Хавин. – Л.: Изд-во «Химия», 1978. – 392 с.

79. Куликов, И.С. Раскисление металлов / И.С. Куликов. – М.: Изд-во «Металлургия», 1975. – 504 с.

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

81. Чекалова, Е. А. 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.

82. Чекалова, Е. А. 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.

83. Чекалова, Е. А. Механическая обработка с применением активированного воздуха / Е. А. Чекалова, П. Д. Чекалов // 77–я Международная научно-техническая конференция ААИ «Автомобиле – тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров» – М.:МГТУ «МАМИ». – 2012. – С. 27 – 29.

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

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

86. Бертеньев, С.С. Детонационные покрытия в машиностроении / С. С. Бертеньев, Ю. П. Федько, А. И. Григоров. – Л.: Машиностроение, 1988. – 215 с.

87. Резников, А. И. Теплофизика процессов механической обработки материалов резанием / А. И. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 212 с.

88. Николаев, Ю. Н. Повышение работоспособности режущих инструментов путем изменения свойств покрытий при их нанесении в комбинированном температурном режиме: дис. канд. тех. наук: 05.03.01 / Николаев Юрий Николаевич. – Ульяновск, 1989. – 221 с.

89. Самсонов, Г. В. Тугоплавкие покрытия / Г. В. Самсонов, А. П. Эпик. –М.: Металлургия, 1973. – 397 с.

90. Рыжкин, А. А. Физические основы обработки материалов резанием: учебное пособие / А.А. Рыжкин, М. М. Климов. – Ростов-на-Дону, Издательский центр ДГТУ, 1996. – 138 с.

91. Чекалова, Е. А. Повышение долговечности режущего инструмента и тяжелонагруженных деталей методом нанесения диффузионного сетчатого

покрытия: монография / Е. А. Чекалова; под ред. Е. А. Чекаловой. – М.: Изд-во Университет машиностроения, 2014. – 127 п. с.

92. Чекалова, Е.А. 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.

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

94. Чекалова, Е. А. Новая технология обработки режущего инструмента путем применения активированного воздуха / Е.А. Чекалова // Журнал известия МГТУ «МАМИ». – 2012. – №2 (14) т.2.– С. 216 – 218.

95. Чекалова, Е. А 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. 118 – 124.

96. Чекалова, Е.А. Повышение износостойкости режущего инструмента путем нанесения сетчатого покрытия / Е. А. Чекалова, П. Д. Чекалов // Журнал известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – №1 (19) т.2. – С.112-117.

97. Чекалова, Е.А. 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.

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

99. Чекалова, Е.А. Экологически чистая технология в машиностроении / Е. А. Чекалова, Н. Н. Ромина // ИТО: инструмент-технология-оборудование. – 2008. – № 3. – С. 12 – 16.

100. Чекалова, Е. А. Способ формирования износостойкого покрытия на поверхности металлической детали / Е. А. Чекалова, П. Д. Чекалов, Р. Д. Соломатина // Патент № 2548835 РФ на изобретение, МПК С23С8/36. Опубликовано 24.03.2015г. Патентообладатель: Чекалова Е. А. Приоритет изобретения 01.11.2013г.

101. Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С., Крымов В.В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении. - М:. Из-во «Высшая школа». – 1999. 514 с.

102. Чекалова Е.А., Абраимов Н.В., Гейкин В.А., Лукина В.В. Восстановление износостойких покрытий на бандажных полках лопаток компрессора ГТД // «Электрометаллургия». – 2016**.** – № 11. – с. 41 – 48.

103. Ю.В. Лахоткин, В.П. Кузьмин, В.В. Душик, Т.В. Рыбкина. Новый низкотемпературный метод нанесения твердых наноструктурированных покрытий на изделия сложной формы // Упрочняющие технологии и покрытия, 2013, № 6, С. 9-15.

104. Ю.В. Лахоткин, Ю.П. Топоров, В.П. Кузьмин и др. Исследование трибологических свойств W2C слоёв, полученных газофазным химическим осаждением // Трение и смазка в машинах и механизмах, 2011, № 2, С. 23-28.

105. Ю.И. Головин. Наноиндентирование и его возможности. М.: Машиностроение, 2009, 316 с.

106. С.С. Бартеньев, Ю.Р. Федько, А.И. Григоров. Детонационные покрытия в машиностроении. - Л.: Машиностроение, 1982, 215 с.

107. Филимонов, В.И. Яковлев, М.А. Корчагин и др. Процессы структурообразования и детонационно-газового нанесения защитных покрытий из композиционных порошков Т1А13 и №3А1 // Физика горения и взрыва, 2008, Т. 44, №5, С. 106-111.

ПРИЛОЖЕНИЕ

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер
ОАО «МПО им. И. Румянцева»
_____ А. А. Пискунов

А К Т №1
производственные испытания твердосплавных пластин IC50M, IC9015, IC3028 и IC9025 фирмы «Искар» в цехе №18.

В рамках совместных работ были проведены производственные испытания твердосплавных пластин IC50M, IC9015, IC3028 и IC9025 фирмы «Искар» с упрочнением и без для чистовой операции обработки деталей. Обрабатываемый материал сталь 40Х. Испытания проводили на токарном станке ТПК125С1. При точении использовали исходные пластины со сплошным покрытием, с диффузионным покрытием и без покрытия. Испытания проводились в ц.18 на режимах: Были проведены стойкостные испытания, где в качестве критерия был износ по задней поверхности режущей кромки пластины.

Режим обработки:
IC50M (v = 190 м/мин; t = 2мм; s = 0,4 мм/об.).
IC3028 (v= 150 м/мин,s= 0,2 мм/об, t=1 мм).
IS 9015 (v = 225 м/мин; s =0,2 мм/об; t = 1 мм).
IC9025 (v=190м/мин; s=0,4мм/об; t=2мм).

В таблице ниже приведены полученные данные:

пластины	Время обработки, мин/ Длина обработки, мм	Износ по задней поверхности режущей кромки, мм
IC50M- сетчатое	2,6 мин	0,074
без покрытия	2,2 мин	0,09
сплошное покрытие	2,2 мин	0,11
IS9015-сплошное	-/280 мм	0,224
СОТС «Москвинол»	-/280 мм	0,188
сетчатое покрытие	-/280 мм	0,157
IC3028-сплошное	56 мин	0,4
СОТС «Москвинол»	55,34 мин	0,378
сетчатое покрытие	55,33 мин	0,33
IC9025-сплошное	72 мин	0,1
СОТС «Москвинол»	72 мин	0,096
сетчатое покрытие	72 мин	0,094

Выводы: В результате испытаний было получено, что износостойкость твердосплавных пластин IC50M при точении стали 40Х (НВ220) в 3-4 раза по сравнению с контрольным инструментом и в 1,8-2,5 раза по сравнению со сплошным покрытием; износостойкость твердосплавных пластин с сетчатым покрытием IC3028, IC9015 и IC9025 при точении стали 40Х (НВ220) в 1,8 – 2,5 раза выше по сравнению со сплошным покрытием и в 1,5-2 раза по сравнению с СОТС «Москвинол».

Начальник цеха № 18 М.Г. Ситниченко

Начальник ТБ цеха №18 П.О.Линник

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер
ОАО «МПО им. И. Румянцева»
_____ А. А. Пискунов

А К Т №1

производственные испытания быстрорежущих пластин Р6М5, Р6М5К5 с геометрией $\lambda = 0^{\circ}$, $\alpha = 18^{\circ}$, $\varphi = 45^{\circ}$, $\varphi_1 = 15^{\circ}$, $\gamma = 8^{\circ}$, r = 1,5мм в цехе №18.

В рамках совместных работ были проведены производственные испытания быстрорежущих пластин Р6М5, Р6М5К5 с упрочнением и без для чистовой операции обработки деталей. Обрабатываемый материал сталь 40Х. Испытания проводили на токарном станке ТПК125С1. При точении использовали исходные пластины со сплошным покрытием, с диффузионным покрытием и без покрытия. Испытания проводились в ц.18 на режимах: Были проведены стойкостные испытания, где в качестве критерия был износ по задней поверхности режущей кромки пластины.

Режим обработки:

Р6М5 (V = 65 м/мин; S= 0,175 мм/об; t=1,0мм.).

Р6М5К5 (V = 80 м/мин; S= 0,175 мм/об; t=1,0мм.).

В таблице ниже приведены полученные данные:

пластины	Время обработки, мин	Износ по задней поверхности режущей кромки, мм
Р6М5 – без покрытия	42 мин	0,52
сплошное покрытие	93мин	0,53
сетчатое покрытие	100мин	0,5
Р6М5К5 – без покрытия	4,50 мин	0,4
сетчатое покрытие	7,37 мин	0,2
сплошное покрытие	5,20мин	0,5

Выводы: В результате испытаний было получено, что износостойкость быстрорежущих пластин Р6М5, Р6М5К5 с сетчатым покрытием при точении стали 40Х (НВ220) в 1,6-2,5 раза выше по сравнению с контрольными и в 1,5-2 раза выше по сравнению со сплошным покрытием.

Начальник цеха № 18 М.Г. Ситниченко

Начальник ТБ цеха №18 П.О.Линник

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер
ОАО «МПО им. И. Румянцева»
А. А. Пискунов

А К Т
внедрения технологии нанесения диффузионного сетчатого покрытия и оборудования «УИВ-1» на заводе

Научно-техническая комиссия в составе: главного технолога ОАО «МПО им. И. Румянцева» А.Э. Алимжанова, начальника отдела А.В. Матросова, составила настоящий акт в том, что предложенная разработанная в докторской диссертации установка «УИВ-1» и технология нанесения диффузионного сетчатого покрытия на режущий инструмент по теме «Повышение долговечности режущего инструмента методом нанесения диффузионного сетчатого покрытия» к.т.н. Чекаловой Е.А., позволяет заменить традиционное «сплошное» покрытие.

В соответствии с предложенной технологией и методикой были проведены производственные испытания твердосплавных пластин IC50M, IC9015, IC3028 и IC9025 фирмы «Искар» с диффузионным сетчатым покрытием, со стандартным сплошным покрытием и без покрытия для токарной обработки деталей из стали 40Х в цехе №18. Акты испытаний прилагаются.

Были также проведены производственные испытания быстрорежущих пластин Р6М5К5 и Р6М5 с геометрией $\lambda = 0^{\circ}$, $\alpha = 18^{\circ}$, $\varphi = 45^{\circ}$, $\varphi_1 = 15^{\circ}$, $\gamma = 8^{\circ}$, r = 1,5мм с диффузионным сетчатым покрытием, со стандартным сплошным покрытием и без покрытия, для токарной обработки деталей из стали 40Х в цехе №18. Акты испытаний прилагаются.

В результате испытаний было получено, что разработанная технология нанесения диффузионного сетчатого покрытия на режущий инструмент позволяет:

- повысить износостойкость быстрорежущего инструмента Р6М5, Р6М5К5 при точении стали 40Х (НВ220) в 4-5 раз по сравнению с контрольным и в 1,5-3 раз по сравнению со сплошным покрытием;
- повысить износостойкость твердосплавного инструмента IC50M при точении стали 40Х (НВ220) в 3-4 раза по сравнению с контрольным инструментом и в 1,8-2,5 раза по сравнению со сплошным покрытием;
- повысить износостойкость твердосплавного инструмента IC3028, IC9015 и IC9025 при точении стали 40Х (НВ220) в 1,5-2 раза по сравнению со сплошным покрытием и в 2 - 3 раза по сравнению с контрольным;

Научно-техническая комиссия считает, что разработанная технология позволяет заменить «сплошное» покрытие на диффузионное сетчатое покрытие для режущего инструмент, так как повышаются технико-экономические показатели работы на заводе. Разработанная к.т.н. Чекаловой Е.А. установка и технология нанесения сетчатого покрытия может быть рекомендована на предприятиях и заводах для повышения стойкости режущего инструмента.

Гл. технолог А.Э. Алимжанов
Нач. отдела А.В. Матросов

«Утверждаю»
Директор филиала «НИИД»
_____ Гейкин В.А.
«___» _____ 2011 г.

Акт №1
производственных испытаний твердосплавных фрез ВК10ХОМ R<1° Z=6 в ц. № 23

В рамках работы по план-графику № 01.102 были проведены производственные испытания твердосплавных фрез ВК10ХОМ R<1° Z=6 с упрочнением и без, для черновой операции обработки титановых лопаток. Обрабатываемый материал ВТ6. Партия деталей 99.01.25.212 и 99.01.25.222. Испытания проводились на станке Liechti с ЧПУ. При черном фрезеровании лопаток использовали две исходные фрезы с упрочнением и одну фрезу после переточки с упрочнением.

Испытания проводились на режимах:

- n = 1020 об/мин (**V = 45 мм/мин**), $S_м$ = 490 мм/мин, **S_z = 0,08 мм/об**.

Испытания проводились в ц. 23.

Были проведены стойкостные испытания, где в качестве критерия был износ по задней поверхности зуба.

В таблице ниже приведены полученные данные:

№ фрезы	**Режимы обработки n/ S_z**	**Время обработанной поверхности, мин**	**Износ по задней поверхности зуба, мм**	**Количество обработанных деталей, шт.**
0905 (исх.)	1020 /0,08	10	**0,12**	**36**
0210 № 1 (упрочнение)	1020 /0,08	10	**0,12**	**54**
0210 № 2 (упрочнение)	1020 /0,08	10	**0,12**	**52**
0311 (переточка с упрочнением.)	1020 /0,08	10	**0,2**	**90**

Вывод: В результате испытаний было получено, что износостойкость твердосплавных фрез ВК10ХОМ R<1° Z=6 с упрочнением при черновом фрезеровании выше в 1,5-2 раза, чем обработка исходных фрез.

Начальник УИП 15.06.11 Е.Г. Полканов

Начальник ц. 23 14.06.11. А.Э. Вансецкий

Мастер 2-ой группы ц.41 И.В. Посохова

Начальник БСТО 16.06.11 В.В. Мясин

Инж. по инструменту ц.23 А.Г. Бурлака

Зам. директора филиала «НИИД» В.А. Горелов

Старший научный сотрудник к.т.н., доцент Е.А. Чекалова

«Утверждаю»

Директор филиала «НИИД»

_____ Гейкин В.А.

«__» _____ 2011 г.

Акт №2

производственных испытаний твердосплавных фрез ВК10ХОМ R<1° Z=4 в ц. № 23

В рамках работы по план-графику № 01.102 были проведены производственные испытания твердосплавных фрез ВК10ХОМ С151-4613/01 Z=4 с упрочнением и без для чистовой операции обработки титановых лопаток. Обрабатываемый материал ВТ6. Партия деталей 99.01.25.212 и 99.01.25.222. Испытания проводились на станке Liechti с ЧПУ. При чистовом фрезеровании лопаток использовали одну исходную фрезу и одну фрезу с упрочнением.

Испытания проводились на режимах:

n = 2725 об/мин (**V = 120 мм/мин**), $S_м$ = 1745 мм/мин, **S_z = 0,16 мм/об**.

Испытания проводились в ц. 23.

Были проведены стойкостные испытания, где в качестве критерия был износ по задней поверхности зуба.

В таблице ниже приведены полученные данные:

№ фрезы	**Режимы обработки n/ S_z**	**Время обработанной поверхности, мин**	**Износ по задней поверхности зуба, мм**	**Количество обработанных деталей, шт.**
12.07(исх.)	2725/0,16	10	**0,5**	**4**
12.08 (упрочнение)	2725/0,16	10	**0,5**	**7**

Выводы: 1. В результате испытаний было получено, что износостойкость твердосплавных фрез ВК10ХОМ R<1° Z=4 с упрочнением при чистовом фрезеровании выше в 1,5 раза, чем обработка исходных фрез.

Начальник УИП 15.06.11 Е.Г. Полканов

Начальник ц. 23 14.06.11. А.Э. Вансецкий

Мастер 2-ой группы ц.41 И.В. Посохова

Начальник БСТО 16.06.11г. В.В. Мясин

Инж. по инструменту ц.23 А.Г. Бурлака

Зам. директора филиала «НИИД» В.А. Горелов

Старший научный сотрудник к.т.н., доцент Е.А. Чекалова

УТВЕРЖДАЮ
Директор филиала «НИИД»
ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют»,
доктор технических наук, профессор

В. А. Гейкин

А К Т

внедрения технологии нанесения диффузионного сетчатого покрытия и оборудования «УИВ-1» на ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют»

Комиссия в составе: начальника управления инструментального производства ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» Полканова Е.Г., заместителя директора филиала «НИИД» ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» Горелова В.А., начальника отдела «Механической обработки» филиала «НИИД» ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» Яковлева М.Г., действующая в соответствии со стандартом предприятия СТП 778.14.577-99, составила настоящий акт в том, что предложенная разработанная в докторской диссертации установка «УИВ-1» и технология нанесения диффузионного сетчатого покрытия на режущий инструмент по теме «Повышение долговечности режущего инструмента и тяжелонагруженных деталей методом нанесения диффузионного сетчатого покрытия» к.т.н. Чекаловой Е.А., позволяет заменить традиционное «сплошное» покрытие.

В соответствии с предложенной технологией и методикой были проведены производственные испытания твердосплавных фрез ВК10ХОМ R<1° Z=6 с диффузионным сетчатым покрытием и без, для черновой и чистовой операции обработки титановых лопаток в цехе №23. Обрабатываемый материал ВТ6. Партия деталей 99.01.25.212 и 99.01.25.222. Испытания проводились на станке «Liechti» с ЧПУ. Акты прилагаются.

В результате испытаний было получено, что износостойкость твердосплавных фрез ВК10ХОМ R<1° Z=6 с диффузионным сетчатым покрытием при черновом фрезеровании выше в 1,5-2 раза и в 1,5 раза выше при чистовом фрезеровании, чем обработка исходных фрез.

Научно-техническая комиссия считает, что разработанная технология позволяет заменить «сплошное» покрытие на диффузионное сетчатое покрытие на режущий инструмент, так как повышаются технико-экономические показатели работы.

Начальник УИП,
кандидат технических наук — Е.Г. Полканов

Зам. директора филиала «НИИД»,
доктор технических наук — В.А. Горелов

Начальник отдела «МО»,
кандидат технических наук — М.Г. Яковлев

Инструмент – Технология
Металлорежущее оборудование

Общество с ограниченной ответственностью "ИТМ"
ИНН 7719678430 КПП 771901001 ОКПО 85799306
107023 г. Москва, Семеновский пер., д 11, стр. 1,
Тел./факс: (495) 366-91-71, (925) 517-43-76
E-Mail: itm-in@yandex.ru www.itm-tools.ru www.itm-mash.ru
р/с 40702810500000000128 в банке ВТБ 24 (ЗАО)
БИК 044525716, к/с 30101810100000000716

Дата:_____

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «ИТМ»
_____ М. А. Потапов

А К Т

внедрения технологии нанесения локального диффузионного покрытия на режущий инструмент

Комиссия в составе: зам. Генерального директора Гусева С.А., инженера Горбушина В.И., менеджера Потапова Е.А., составила настоящий акт в том, что предложенная технология нанесения локального диффузионного покрытия MeO-O_2 на режущий инструмент, разработанная в докторской диссертации к.т.н. Чекаловой Е.А., позволяет заменить традиционное покрытие (AlTi)N.

В соответствии с предложенной технологией и методикой были проведены производственные испытания твердосплавных концевых фрез «SGS-Z1M» Ø 12мм Z=4 с локальным диффузионным покрытием MeO-O_2, с покрытием (AlTi)N и без покрытия для фрезерования «образца - детали» из титанового сплава. Испытания проводились на машине «HAAS», с использованием СОЖ на чистовом режиме: n= 2426 об/мин, s_M = 455 мм/мин, t = 12 мм.

В результате испытаний было получено, что концевые твердосплавные фрезы с локальным диффузионным покрытием MeO-O_2 имеют износостойкость в 1,3 раза выше фрез со сплошным покрытием (AlTi)N и в 1,6 – 2 раза выше исходных фрез без покрытия.

Комиссия считает, что разработанная технология нанесения локального диффузионного покрытия MeO-O_2 позволяет применить данное покрытие на режущий инструмент, и тем самым повысить технико-экономические показатели работы на предприятии. Разработанная к.т.н. Чекаловой Е.А. технология нанесения локального диффузионного покрытия может быть использована на предприятиях и заводах для режущего инструмента сложной конфигурации.

Зам. Генерального директора — Гусев С.А.

Инженер — Горбушин В.И.

Менеджер — Потапов Е.А.

"ИТМ" "ITM" Ltd

КАЙЛАС
Общество с ограниченной ответственностью ТД «КАЙЛАС»
ИНН 7719416836, КПП 771901001, ОГРН 1157746560608, ОКПО 46456403
105484 г. Москва, ул. Парковая 16-я, дом 27, пом. VII
т/ф.: +7 (499) 391-56-44; www.td-kaylas.ru; e-mail: td-kaylas@yandex.ru
р/с № 40702810738000040119 в ОАО «Сбербанк России» БИК 044525225
к/с № 30101810400000000225

№ _____ от_____ г.

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО ТД «КАЙЛАС»
_____ В.Н. Репин

А К Т
о реализации установки «УИВ-1» и технологии нанесения локального диффузионного покрытия на режущий инструмент

Комиссия в составе: начальника отдела Никулиной О.В., инженера Клочкова А.В., составила настоящий акт в том, что предложенная установка «УИВ-1» и технология нанесения локального диффузионного покрытия на твердосплавный режущий инструмент, разработанные в докторской диссертации к.т.н. Чекаловой Е.А., позволяют заменить сплошное покрытие (AlTi)N на локальное диффузионное покрытие типа MeO-O_2 без изменения геометрических параметров режущего инструмента.

В соответствии с предложенной технологией и методикой были проведены производственные испытания концевых твердосплавных фрез Ø 12мм, Z=4 фирмы «Guhring» с локальным диффузионным покрытием типа MeO-O_2, с покрытием (AlTi)N и без покрытия для фрезерования «образца - детали» из легированной стали 30. Испытания проводились на машине «HAAS», с использованием СОЖ на чистовом режиме: v= 140 м/мин, s_M = 1015 мм/мин, t=15 мм.

В результате испытаний было получено, что концевые твердосплавные фрезы с локальным диффузионным покрытием типа MeO-O_2 имеют износостойкость в 1,2 раза выше фрез с покрытием (AlTi)N, и в 1,8 – 2 раза выше, чем фрезы без покрытия.

Комиссия считает, что разработанная технология нанесения локального диффузионного покрытия типа MeO-O_2 позволяет применять данное покрытие на режущий инструмент, так как повышаются технико-экономические показатели работы на предприятии. Разработанная к.т.н. Чекаловой Е.А. установка и технология может быть рекомендована на предприятиях и заводах для выполнения фрезерных работ с режущим инструментом сложной конфигурации.

Начальник отдела Никулина О.В.

Инженер Клочков А.В.

ТД «КАЙЛАС» МОСКВА

УТВЕРЖДАЮ
Технический директор
АО «МПО им. И. Румянцева»
_____ А. А. Пискунов

А К Т

внедрения технологии нанесения дискретного диффузионного покрытия на режущий инструмент

Научно-техническая комиссия в составе: главного технолога АО «МПО им. И. Румянцева» Матросова А.В., инженера по инструменту Воронов А.Ю., составила настоящий акт в том, что предложенная технология нанесения дискретного диффузионного покрытия на сложнопрофильный режущий инструмент, позволяет существенно повысить износостойкость исходного инструмента без покрытия.

В соответствии с предложенной технологией и методикой были проведены производственные испытания быстрорежущих долбяков Р18 с геометрией m = 5 мм; z = 20; d_0=88,114; $\alpha = 28^{o}$; $\gamma = 10^{o}$ с дискретным диффузионным покрытием и без покрытия для обработки деталей шестерня из стали 16Х3НВФБМ-Ш в механосборочном цехе № 12.

Акт испытаний прилагается.

В результате испытаний было получено, что разработанная технология нанесения дискретного диффузионного покрытия на сложнопрофильный режущий инструмент позволяет:

- повысить износостойкость быстрорежущего долбяка из Р18 при зубодолбежной операции (сталь 16Х3НВФБМ-Ш) в 1,5 раз по сравнению с контрольным при чистовой обработке.

Научно-техническая комиссия рекомендует применение разработанной технологии дискретного диффузионного покрытия на сложнопрофильном режущем инструменте, так как повышаются технико-экономические показатели работы на заводе. Разработанная технология нанесения дискретного диффузионного покрытия может быть рекомендована на предприятие для механообработки деталей.

Гл. технолог А.В. Матросов

Инженер по инструменту А.Ю. Воронов

УТВЕРЖДАЮ
Технический директор
АО «МПО им. Румянцева»
_____ А. А. Пискунов

А К Т №1

производственные испытания быстрорежущих долбяков Р18 с геометрией m = 5 мм; z – 20; d_0=88,114; $\alpha = 28^\circ$; $\gamma = 10^\circ$ в механосборочном цехе № 30

В рамках совместных работ были проведены производственные испытания быстрорежущих долбяков Р18 с дискретным диффузионным покрытием и без покрытия для чистовой операции обработки деталей. Обрабатываемый материал сталь 16Х3НВФБМ-Ш. Испытания проводились на зубодолбежном станке модели KCM-SN5F3 в механосборочном цехе № 30. Испытания проводили на чистовой обработке на режимах: v = 150 дв.х./мин; t = 0,100 мм; s = 0,010 мм/дв.х., где дв.х. = 36 мм.

В качестве критерия был износ по передней режущей кромке зубьев инструмента.

(Вставка в виде таблиц результатов)

Долбяки	Время обработки, мин (Количество деталей, шт.)	Износ по передней режущей кромке зубьев инструмента , мм
Р18 - дискретное покрытие	31/1 всего 1085/35	0.1
Р18 - без покрытия	31/1 всего 620/20	0,1

Вывод: в результате испытаний было получено, что производительность долбяков Р18 с дискретным покрытием при обработке в 1,5 раз выше по сравнению с контрольными при чистовой обработке.

Инженер по инструменту Воронов А.Ю

Инженер Журавлев А.В.

Аспирант Твердохлебов А.С.

«Утверждаю»

Главный инженер

_____ Нуртдинов Ю.Р.

«__» ____ 2018 г.

Акт № 1

по проведению производственных испытаний на операции №100 «Фрезерная с ЧПУ» обработки сборочной единицы 222.01.03.001-01 «Колесо 1-й ступени» в ц. № 43

В цехе №43 сотрудниками Политехнического университета, сотрудниками АО «НПД технология» и представителями цеха были проведены производственные испытания твердосплавных фрез ВК10ХОМ R8 Z=4 с упрочнением и без, для черновой операции обработки титановых колес 1-й ступени согласно серийной технологии. Обрабатываемый материал ВТ6. Партия деталей 222.01.03.001-01. Испытания проводились на станке МЦ-1300 с ЧПУ. При черном фрезеровании колес 1-й ступени использовали семь исходных фрез ручной заточки кромки и семь фрез станочной заточки кромки с диффузионным оксидным покрытием (WO_3-Co_3O_4) без изменения геометрических параметров режущего инструмента.

Испытания проводились на режимах с использованием СОЖ (TRIM E708): уровень 1- 4 - n = 900 об/мин; $S_м$ = 220 мм/мин, уровень 5 - 7 - n = 450 об/мин; $S_м$ = 220 мм/мин. В качестве критерия был износ по задней поверхности зуба $h_з$.

В ходе исследования были полученные данные:

№ фрезы	Износ по задней поверхности зуба, мм	Количество обработанных каналов/выравнивание лопаток, шт.
Р6154-3174 WO_3-Co_3O_4	0,6	10/10
Р6154-3174 WO_3-Co_3O_4	0,6	9/9
Р6154-3173 WO_3-Co_3O_4	0,6	7/10
Р6154-3173 WO_3-Co_3O_4	0,6	12/9
Р6154-3172 WO_3-Co_3O_4	0,5	19/19
Р6154-3171 WO_3-Co_3O_4	0,5	19/19
Р6154-3170 WO_3-Co_3O_4	0,5	19/19
Р6154-3234	0,6	7/9
Р6154-3234	0,6	12/10
Р6154-3235	0,6	7/9
Р6154-3235	0,6	12/10
Р6154-3172	0,5	10/10
Р6154-3171	0,5	14/14
Р6154-3170	0,5	14/14

Замечаний по работе используемого режущего инструмента не выявлено. Выдача технологических рекомендаций на инструмент и режимы резания не требуются.

В результате испытаний было получено, что износостойкость концевых твердосплавных фрез с диффузионным оксидным покрытием при черновом фрезеровании составляет 30 – 40%, относительно фрез без покрытия.

Мастер ц. 43 Фонькин Ю.В.

Зам. нач. цеха 43по ПП Кондрашов О.В.

Начальник отдела
ТМО УГТ Наумов В.В.

Инженер Политехнического университета Никулин Н.Д

Проф.каф. «ТиОМ» Чекалова Е.А.

Ведущий специалист
АО «НПД технология» Журавлев А.В.

Акционерное общество
« Мытищинский машиностроительный завод»
Механический цех №1

АКТ № 1/22 от 07.09.2020 г.

Комиссия в составе:

Председатель – начальник БИХ Ляхов В.М.

Члены комиссии:

Инженер-технолог ОГТ Томаку К.А.
Мастер цеха (участка) №1 Ермаков А.В.
Инженер по инструменту ОИХ Потравнов А.Е.

29.07.2020 г. на АО «ММЗ» в цехе №1 были проведены испытания фрезы 1300-175 после переточки с последующим покрытием на дет. 569-20.10.184 «Полумуфта». Фреза обработала 20 деталей в рабочем режиме, до износа чистота обработки и размеры в допуске.

Вывод комиссии:

По результатам испытаний, фреза 1300-175 может быть использована в производстве.

Председатель комиссии: _____ Ляхов В.М.

Члены комиссии: _____ Томаку К.А.

_____ Ермаков А.В.

_____ Потравнов А.Е.

Утверждаю

Начальник ОКС

Акт сравнительных испытаний инструмента

Цех №6

Дата

Наименование детали: Гайка

Номер детали: 589-12.40.204

Станок	Рек. наименование	Эскиз или фотография детали			
Модель станка	1Б240-6				
Мощность kW/hm	15кВ				
Производитель					
Заготовка	пруток				
Материал	35хл				
Термическая обработка					
Твердость					
Предел прочности	N / мм²				
Прерывистое резание					
Операция					
Иструмент	Метчик	новый инструмент	Изношен. инстр.		
М20х1,5-6Н					
Кол-во зубьев					
Производитель		ОС с упрочнением	ОС		
Модель инструмента		ОС 6489N3 М20х1,5	ОС 6489N3 М20х1,5		
Режущая пластина					
Стружколом					
Марка твердого сплава/покрытие					
Охлаждение		Масло	Масло		
Режимы резания	Коэф. Обраб.				
Количество оборотов	n = rpm	в соответствии с ТП	в соответствии с ТП		
Скорость резания	v_c = m / min	в соответствии с ТП	в соответствии с ТП		
Подача на оборот	f = mm / U	в соответствии с ТП	в соответствии с ТП		
Скорость подачи	v_f = mm / min	в соответствии с ТП	в соответствии с ТП		
Глубина резания	a_p = mm	в соответствии с ТП	в соответствии с ТП		
Ширина резания	a_e = mm	в соответствии с ТП	в соответствии с ТП		
Время резания	t_c = min	0,2	0,2		
Результат					
Кол-во деталей на кромку (средн.)		1500	1000		
Стойкость в мин. T = min					
Критерий стойкости					
Внешний вид					
Износ по задней	$V_{3 изн.}$ mm				
поверхности	$V_{Сзад.}$ mm				
Выкрашивание					
Экономический расчет					
Стоимость инстр-та	$R_{инстр}$				
	шт	1	1		
Затраты на партию	Rзатр	0,00	0,00		
Экономич. Эффективн. (на партию)		0,00			
Форма стружки		Завитая			

Рабочая комиссия

Инженер по инструменту: Егорова Н.А.

Инженер-технолог ОГТ: Смирнов А.Д.

Инженер по инструменту: Воронцова А.Д.