

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Чекаловой Елены Анатольевны «НАУЧНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ДЕТАЛЕЙ ДИСКРЕТНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ ОКСИДНЫХ СЛОЕВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ДОЛГОВЕЧНОСТИ»,

представленной к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

Актуальность темы диссертации

Стратегия повышения надежности и долговечности машин требует коренного улучшения качества деталей и узлов производимой продукции.

Научные исследовательские работы, выполняемые по государственным программам перспективных авиационных комплексов, входят в перечень первоочередных задач современного авиационного материаловедения и технологии. От их решения в существенной мере зависит как прогресс в двигателестроении и смежных областях промышленности в целом, так и получение ряда инновационных теоретико-прикладных разработок в области материаловедения. Значимость таких работ отражается в ежегодных посланиях Президента РФ, а также в ряде государственных программ и специальных документов соответствующих ведомств. Актуальность исследований подтверждена Государственной научно-технической программой Российской академии наук с 2010 года до 2015г., в частности такими ее проектами, как «Исследование физико-химических закономерностей взаимодействия электронных, ионных и плазменных потоков с поверхностью конструкционных и инструментальных материалов, моделирование и разработка проектов электронно-ионно-плазменных технологий»; «Многофункциональные ионно-плазменные покрытия для изделий межотраслевого назначения»; «Композиционные конденсированные ионно-плазменные покрытия для изделий машиностроения» и др. 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.

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.

Диссертация Чекаловой Е.А. направлена на 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, в связи с этим тема диссертации является актуальной.

Общая характеристика

Диссертационная работа представлена в области материаловедения, металловедения, технологии машиностроения, теории резания и упругопластического деформирования, теории механической и статистической физики. Проведен сравнительный анализ методов нанесения покрытий на режущий инструмент, который позволил определить возможность использования метода нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя с поликристаллической структурой для повышения долговечности режущего инструмента, снижая риск хрупкого разрушения режущего клина инструмента при действии циклических механических и термических нагрузок. Проанализированы физико-химические особенности формирования дискретного диффузионного оксидного слоя на металлическую подложку, разработана концепция формирования оксидного слоя на режущие инструменты с последующей разработкой теоретической модели долговечности образца с диффузионным дискретным оксидным слоем, включая методику и критерию оценки долговечности.

Изложены методы проведения исследований и изучения свойств материалов, разработанные диссертантом. В частности, технология формирования диффузионного дискретного оксидного слоя с использованием положительного униполярного коронного разряда, методы исследования структуры и состава, режущих и физико-механических свойств диффузионных слоев. Стоит отметить тщательный подход автора к проработке, в частности, разработке технологии формирования диффузионного дискретного оксидного слоя.

Результаты теоретических и экспериментальных работ представлены в достаточном количестве и качестве понимания, изложенного в работе в виде графиков, таблиц и иллюстраций. Анализ экспериментальных данных и расчетов проведен на высоком уровне, а полученные выводы обоснованы и не позволяют усомниться в достоверности.

Научная новизна работы

Чекаловой Е.А. достаточно четко сформулированы основные научные результаты, определяющие научную новизну диссертации:

1. Установлено, что при обработке током коронного разряда в диапазоне $I_K = 140 - 440$ мкА при температуре $20-25^\circ\text{C}$ на поверхности инструментальных и конструкционных материалов Р6М6, Р6М5К5, ВК10ХОМ, ВТ3-1 происходит образование дискретных оксидных слоев состава $(\text{Fe}_x\text{O}(x \sim 0,84-0,96), \text{Fe}_2\text{O}_3; \text{Fe}_3\text{O}_4; \text{WO}_2(\delta); \text{Co}_3\text{O}_4(\text{II}, \text{III}), \text{CoO}(\text{II}); \text{WO}_{2,90}; \text{WO}_{2,72}; \text{TiO}, \text{Ti}_2\text{O})$.

2. Разработана физико-химическая модель формирования диффузионного дискретного оксидного слоя в зоне контакта металла с потоком образующейся холодной воздушной плазмы. На основе разработанной модели рассчитаны пороговый коэффициент активации коронного разряда начала протекания процесса ионизации и электрические параметры стационарного процесса формирования оксидного слоя. Показано, что плотность заряда и положительных ионов, осаждаемых на поверхности металла, должны соответствовать $\rho_i^+ \sim K_i^+ \cdot \rho_C = (1,23-12,3) \cdot 10^{-3}$ мг/м³ и $n_i^+ \sim K_i^+ \cdot n_C = (2,547-25,47) \cdot 10^{16}$ 1/м³, соответственно.

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

4. В качестве характеристики энергоемкости инструментального материала по отношению к износу предложена эффективная молярная энергия активации $U_{\text{ЭФ}}$. Установлена взаимосвязь между периодом стойкости режущего инструмента $T_{\text{СТ}}$, средней температурой его режущей кромки T и соответствующей им эффективной величиной молярной энергоемкости $U_{\text{ЭФ}}$ процесса износа.

5. Установлено влияние химического состава газовой среды и параметров коронного разряда на структуру оксидного слоя на поверхности подложки из обрабатываемого материала. Показано, что поликристаллическая структура со средним размером зерна около 4 мкм, содержащая промежуточные оксидные фазы $(\text{Fe}_x\text{O}(x \sim 0,84-0,96), \text{Fe}_2\text{O}_3; \text{Fe}_3\text{O}_4; \text{WO}_2(\delta); \text{Co}_3\text{O}_4(\text{II}, \text{III}), \text{CoO}(\text{II}); \text{WO}_{2,90}; \text{WO}_{2,72}; \text{TiO}, \text{Ti}_2\text{O})$ нестехиометрического состава, формируется в дискретном слое толщиной 0,90-0,95 мкм, при этом тип оксидных фаз определяется разным процентным содержанием кислорода в потоке холодной плазмы.

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

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

8. Показано, что при поперечном точении стали 40Х резцом с твердосплавной пластиной IC50М 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 BK10ХОМ – снижению износа задней поверхности зуба на 40% (с 0,20 до 0,12 мм) при черновом фрезеровании титановых лопаток из сплава ВТ6.

Практическая значимость диссертации:

1. Разработана технология обработки режущего инструмента на воздухе то-ком коронного разряда при температуре 20–25 °С для создания на поверхности диффузионных дискретных оксидных слоев системы $Me-MeO-MeO-O_2$. Формирование таких слоев увеличивает долговечность инструмента из быстро-режущих материалов в 1,5–3 раза, из твердосплавных материалов в 1,8–2,5 раза и циклическую долговечность на 30–50% по сравнению со сплошным стехиометрическим покрытием.

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

3. Разработаны практические рекомендации по выбору режимов нанесения дискретного оксидного слоя на режущую кромку инструмента для получения не-обходимой структуры, обеспечивающей высокую

износостойкость: сила тока 390–410 мкА, давление сжатого воздуха 0,2–0,25 МПа, время обработки инструмента из сплавов на основе железа 3 часа; а из твердых сплавов – 4 часа.

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

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

Достоверность полученных результатов

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждена результатами большого объема выполненных экспериментов и исследований, проведенных с использованием современных аналитических методов и аттестованного оборудования, а также согласуются с данными других авторов. Кроме того, достоверность результатов и обоснованность выводов подтверждаются их признанием научной общественностью на международном и всероссийском уровне, публикациями в рецензируемых журналах и положительными результатами практической реализации разработок.

В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследования, методы металлографического, рентгеноструктурного анализа для выявления структуры и исследования физико-механических свойств и износостойкости как инструментальных, так и конструкционных материалов.

Основные выводы работы и защищаемые положения обоснованы применением методов анализа исследуемых материалов, корректным применением физических и математических моделей изучаемых процессов.

Содержание диссертации согласно содержанию диссертации и автореферата соответствует специальности 2.6.5 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы» по п.3., п.5 и п.6.

Замечания по диссертационной работе

1. В качестве замечания стоит отметить, что пункт 8 научной новизны является важным результатом представленной работы, но по своей сути его стоит отнести в раздел практической значимости работы.

2. В разделе 3.1. Методика проведения процесса формирования диффузионного дискретного оксидного слоя на странице 144 сказано, что

данные покрытия были нанесены на пластины IC9015 и IC9025, согласно данным производителя

<https://www.iscar.com/eCatalog/Grade.aspx?grade=IC9025&lang=RU> и <https://www.iscar.com/eCatalog/Grade.aspx?grade=IC9015&item=6290043&fnum=255&mapp=TG&app=0> на материалы IC9015 и IC9025 методом CVD нанесены покрытия следующего состава TiCN+Al₂O₃+TiN, из дальнейших материалов диссертации не ясно, какого состава получились дискретные покрытия и как это влияет на стойкость и износ данного материала. Какова цель нанесения дискретного покрытия на многослойный износостойкий материал?

3. Из описания диссертации пункта 3.3 Методика определения режущих свойств. Оборудование, инструмент обрабатываемый материал нет ясности, какие были выбраны основные параметры обработки резанием: скорость резания, подача, черновая или чистовая обработка, с применением СОЖ или без нее.

4. На рисунке 6.4 странице 215 диссертации не показана зависимость износа твердосплавных пластин от длины обработки при продольном точении, так как по оси абсцисс приведено одно значение длины обработки 280мм, фактически приведена зависимость от вида покрытия и условий обработки.

5. На рисунке 7.14 страница 248 название рисунка Результат микрорентгеновского анализа сплав ВИТ-1 неправильное название рисунка – так как показан шлиф с выделенными областями для микрорентгеноспектрального анализа и таблица состава должна даваться отдельно, а не в рисунке. Не выделено, где находится область основы. Это же замечание относится и к рисунку 7.18 страница 252 и к рисунку 7.24 страница 258

6. В тоже время в тексте диссертации ссылка на рисунок 7.14 названа "спектральная структура", что это значит.

7. Не аккуратно оформлен текст автореферата, имеются грамматические ошибки, например на странице 3 в разделе Актуальность 5 строка слово материалы без буквы "м" и т.д.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации.

Заключение

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертации.

Представленная диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Тема диссертации соответствует заявленной специальности, а полученные результаты соответствуют поставленной цели и задачам работы. Диссертация выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной, практической

ценностью, является самостоятельной и законченной научно исследовательской работой, в которой изложены научно обоснованные технические и технологические решения по формированию на поверхности режущего инструмента и деталей дискретных диффузионных оксидных слоев для повышения их долговечности.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 23 научно-технических конференциях, опубликованы в 61 печатной работе, в том числе 23 статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, и 5 статьях в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в области получения новых материалов.

В диссертации решена важная задача по разработке нового типа диффузионных покрытий с дискретной ячеистой структурой нестехиометрического состава, разработан технологический процесс нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя на режущий инструмент с помощью коронного разряда, что является принципиально новым решением проблемы долговечности деталей машин и инструмента.

Диссертационная работа удовлетворяет критериям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Чекалова Елена Анатольевна, заслуживает присуждения ей ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.5– Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Еремеева Жанна Владимировна,
профессор кафедры порошковой металлургии
и функциональных покрытий НИТУ МИСиС, д.т.н.


(Еремеева Ж.В.)

24.12.2021г.

Подпись Еремеевой Жанны Владимировны удостоверяю.

Проректор по
и общим вопросам
НИТУ «МИСиС»



ЗАВЕРЯЮ

М. Исаяв

119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Электронный адрес: kancela@misis.ru

Телефон: +7 495 955-00-32