

В диссертационный совет Д 24.2.327.04 в  
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский  
университет)» (МАИ)  
Ученому секретарю дис. совета  
д.т.н., проф. Скворцовой С.В.  
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4,  
А-80, ГСП-3, МАИ.

### ОТЗЫВ

на автореферат диссертации **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

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.

**Научная новизна работы** заключается в:

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

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

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

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

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

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

#### **Практическая значимость работы:**

1. Разработана технология обработки режущего инструмента на воздухе током коронного разряда при температуре 20–25 °С для создания на поверхности диффузионных дискретных оксидных слоев системы  $Me-MeO-MeO-O_2$ . 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 различной номенклатуры и типоразмеров, отличающаяся высокой производительностью, малым потреблением энергии и ресурсов и возможностью использования для различных типов производств.

3. Разработаны практические рекомендации по выбору режимов нанесения дискретного оксидного слоя на режущую кромку инструмента для получения 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 результатов работы** подтверждается результатами проведенных исследований по упрочнению сложнопрофильного режущего инструмента для качественной обработки деталей используются на предприятиях: ОАО «МПО им. И. Румянцева», АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», ООО «ИТМ», АО «ММЗ», ПАО «АК Рубин», ООО «РИП» и на ООО ТД «КАЙЛАС», а результаты проведенных исследований на деталях используются на АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», ООО ТД «КАЙЛАС». Экономический эффект составил

свыше 40 млн. рублей (в ценах 2019 года).

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

Связь работы с научными программами, темами:

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

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

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

**По автореферату имеются замечания:**

1. В качестве замечания по тексту автореферата можно отметить, что из данного текста не ясно были ли реализованы попытки дополнительного улучшения служебных свойств покрытий, например, с помощью локальной поверхностной термообработки.


2. Из текста автореферата не понятно, анализировалась ли влияние температуры, при которой происходит формирование дискретного покрытия, ведь для быстрорежущего материала это немаловажно.

Указанное замечание не снижает практической значимости диссертации, которая выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет всем требованиям Положения ВАК РФ к докторским диссертациям, а ее автор, Чекалова Елена Анатольевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.5– Порошковая металлургия и композиционные материалы.

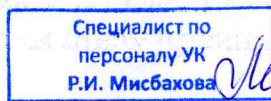
Профессор кафедры «Иновационные технологии машиностроения» ПНИПУ,

д.т.н., доцент



 / Каменева Анна Львовна/

Подпись Чашемовой А.А. удостоверяю,



Ф.И.О.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)

614990, РФ, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

Тел./факс: +7 (342) 2-198-067, 212-39-27

E-mail: [rector@pstu.ru](mailto:rector@pstu.ru)