

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., доц. 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

Исследование в области повышения долговечности режущего инструмента с функциональными износостойкими покрытиями находят широкий интерес в области материаловедения. Многообразие факторов, влияющих на работоспособность режущего инструмента с покрытием, усложняют задачу повышения долговечности. Кроме того, задачи установления функциональных зависимостей между технологическими параметрами процесса синтеза износостойкого покрытия и изнашиванием инструмента до настоящего времени не решены вследствие сравнительно низкой долговечности покрытия.

Представленная диссертация Чекаловой Е.А. посвящена повышению долговечности режущего инструмента и деталей за счет нового типа диффузионных покрытий с дискретной ячеистой структурой нестехиометрического состава, обладающих повышенной износостойкостью, в связи с этим тема диссертации является актуальной.

**В работе решена научная новизна, которая** заключается в следующем:

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  $\rho_i^+ \sim K_i^+ \cdot \rho_{\text{С}} = (1,23-12,3) \cdot 10^{-3} \text{ мг/м}^3$  и  $n_i^+ \sim K_i^+ \cdot n_{\text{С}} = (2,547-25,47) \cdot 10^{16} \text{ 1/м}^3$ , 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 металлу, 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  $U_{эф}$ . 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.

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

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

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

8. Показано, что при поперечном точении стали 40X 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 определяется следующим:

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 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.

Таким образом, актуальность, научная новизна, практическая значимость и достоверность выполненных автором исследований не вызывает сомнений. Степень научной и практической апробации достаточна.

Экономический эффект составил свыше 40 млн. рублей (в ценах 2019 года).

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

**По автореферату имеются замечания:**

1. Из текста автореферата недостаточно ясно с какой скоростью двигаются ионы и какая плотность потока, анализировалась ли влияние температуры, при которой происходит формирование дискретного покрытия, так как для быстрорежущего материала это немаловажно.

2. Несмотря на многочисленные упоминания об установлении функциональных связей между композицией диффузионного оксидного слоя и технологическими параметрами его формирования, в автореферате данная информация не конкретизирована, что затрудняет оценку степени проработки вопроса.

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 технологии материалов и транспорта  
доктор технических наук по спец. 05.16.01,  
профессор

Колмыков Валерий Иванович

12.01.2020г.

Адрес организации: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94  
Наименование организации: Юго-Западный государственный университет  
Электронный адрес: [vestnik@yuzsu.ru](mailto:vestnik@yuzsu.ru)  
Телефон: +7 (471) 50-48-00



Подпись Е.А. Чекалова  
Достоверно  
Специалист по кадрам