

ОТЗЫВ

официального оппонента Филиппова Михаила Александровича, профессора, доктора технических наук, профессора кафедры «Металловедение» УрФУ на

диссертационную работу Чекаловой Елены Анатольевны «Научные и технологические основы формирования на поверхности режущего инструмента и деталей дискретных диффузионных оксидных слоёв для увеличения их долговечности», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

Ключевым звеном, определяющим трудоёмкость и себестоимость технологической цепи изготовления изделий в машиностроении являются операции обработки металлов резанием – точение, фрезерование, строгание, сверление и т.п., а во взаимодействии режущего инструмента с поверхностью обрабатываемых деталей решающее значение имеет стойкость и долговечность инструмента. Этот фактор и определяет несомненную актуальность темы докторской диссертационной работы Е.А. Чекаловой «Научные и технологические основы формирования на поверхности режущего инструмента и деталей дискретных диффузионных оксидных слоёв для увеличения их долговечности» для теории и практического использования полученных ей в работе результатов по разработке новой эффективной технологии получения дискретных оксидных слоёв на режущих кромках инструмента.

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

Во введении автором обоснованы актуальность, цель и задачи работы, сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость, достоверность результатов работы.

Научная новизна

Научную новизну работы обеспечивают результаты по разработке научных основ и технологических режимов формирования на поверхности режущего инструмента из быстрорежущей стали и твёрдого сплава и деталей компрессоров авиадвигателей дискретных диффузионных оксидных слоёв при обработке током коронного разряда. Привлечены физико-химические представления для объяснения формирования диффузионного дискретного оксидного слоя в зоне контакта металла с потоком образующейся во электрические параметры стационарного процесса формирования оксидного слоя. Предложена физическая модель влияния дискретного и сплошного диффузионных оксидных слоёв на

долговечность поверхностности металлических материалов, основанная на сопоставлении упругой деформации, модуля упругости и коэффициента Пуассона, и утверждается, что формирование дискретного оксидного слоя приводит к снижению растягивающих напряжений в слое металла, изменению термофлуктуационного механизма разрушения нагруженных межатомных связей, и к увеличению долговечности металла инструмента.

В качестве характеристики энергоемкости инструментального материала по отношению к износу предложено представление о химической эффективной молярной энергии активации $U_{ЭФ}$.

Изучена структура оксидного слоя на поверхности подложки из обрабатываемого материала, представляющую собой поликристаллическую структуру с размером зерна около 4 мкм, содержащую 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, формирующуюся в дискретном слое толщиной 0,90-0,95 мкм, которая в процессе обработки резанием в результате нагрева инструмента из сплавов на основе железа переходит 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.

Практическая значимость

Разработанная технология обработки режущего инструмента на воздухе током коронного разряда при температуре 20–25 °С для создания на поверхности диффузионных дискретных оксидных слоев системы $Me-MeO-MeO-O_2$ позволяет увеличить долговечность инструмента из быстрорежущих материалов в 1,5–3 раза, из твердосплавных материалов в 1,8–2,5 раза и циклическую долговечность на 30–50% по сравнению со сплошным стехиометрическим покрытием. Для выбора оптимальных параметров технологии нанесения локального диффузионного дискретного оксидного слоя предложена модель, показывающая 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 и практические рекомендации по выбору режимов нанесения дискретного оксидного слоя на режущую кромку инструмента для получения необходимой структуры, обеспечивающей высокую износостойкость. Применение дискретного оксидирования пластины вместо сплошного способствует снижению фаски износа на 23 % при поперечном точении стали 40Х резцом с твердосплавной пластиной IC50M, а дискретное оксидирование твердосплавных фрез BK10ХОМ – снижению износа задней поверхности зуба на 40 % при черновом фрезеровании лопаток из сплава BT6.

К важным достижениям работы относится разработка установки 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.

Разработанный способ повышения долговечности лопаток компрессора авиационных ГТД путем восстановления геометрических размеров и износостойкого покрытия антивибрационных полок защищён патентом №2586191, а разработанный технологический процесс на режущий инструмент с помощью коронного разряда находится в стадии внедрения на ведущих предприятиях авиастроительной отрасли.

Достоверность, новизна и обоснованность научных положений

Новизна результатов заключается в том, что в работе предлагается новое решение проблемы долговечности деталей машин и режущего инструмента, состоящее в разработке нового типа диффузионных покрытий с дискретной ячеистой структурой оксидов нестехиометрического состава, обладающих повышенной износостойкостью.

Достоверность и воспроизводимость результатов обеспечена использованием совокупности современных взаимодополняющих апробированных методов для металлофизического исследования (сканирующей электронной микроскопии, оптической микроскопии, а также микроиндентирования структурных составляющих) и разработкой специального оборудования для реализации нанесения покрытий, что повышает степень надёжности сделанных оценок и выводов.

Ценность для науки и практики

В качестве наиболее важных результатов, определяющих научно-практическую ценность работы, служит показанная экспериментально возможность формирования при обработке током коронного разряда на поверхности металлорежущего инструмента из быстрорежущей стали и твёрдого сплава и деталей компрессоров авиадвигателей из титановых сплавов дискретных диффузионных оксидных слоёв, повышающих эксплуатационную стойкость. Новый тип диффузионных покрытий получил в работе практическую реализацию в виде разработанных технологических режимов и соответствующего оборудования для повышения долговечности инструмента и лопаток компрессора.

Оценка содержания

Работа состоит из семи глав. В первой главе на основе литературных данных проведён сравнительный анализ методов нанесения покрытий на режущий инструмент и способов формирования поверхностного слоя при различных способах нанесения диффузионных износостойких покрытий на широко

используемый в промышленности режущий инструмент (резцы с механическим креплением четырехгранных пластин из быстрорежущей стали и твердого сплава, а также твердосплавные фрезы). Приведена классификация методов нанесения износостойких покрытий в зависимости от условий их применения. Проанализированы достоинства и недостатки покрытий, формируемых при химическом и физическом осаждении, ионной имплантации, лазерном и электроискровом упрочнении. Для достижения поставленной цели работы сформулированы задачи исследования и намечены последовательные пути их решения от разработки теоретической модели долговечности образца с диффузионным дискретным оксидным слоем для сравнительной оценки влияния дискретного оксидного слоя и сплошного покрытия на физико-механические свойства поверхностного слоя материала до разработки оборудования и технологии получения диффузионных дискретных оксидных слоев на инструментальных и конструкционных материалах.

Вторая глава посвящена разработке теоретической модели долговечности образца с диффузионным дискретным оксидным слоем, оценке влияния дискретного оксидного слоя на долговечность с возможностью использования эффекта торможения, и даже остановки образовавшейся в процессе эксплуатации локальной трещины, за счет создания на границе раздела пониженного значения модуля упругости. Особенностью рассматриваемой модели является сопоставление деформации при упругом растяжении сплошного и дискретного оксидного слоя, модуля упругости E и коэффициента Пуассона μ , формально выступающих в роли интегральной характеристики. Приведены справочные данные по E и μ для металлов и их соединений, используемых в качестве покрытий. Проведена оценка влияния диффузионного дискретного оксидного слоя на долговечность образца и показано, что при фиксированной относительной деформации образца диффузионный дискретный оксидный слой, приводит к увеличению долговечности за счет снижения растягивающих напряжений в областях локальных покрытий.

В третьей главе представлены методики проведения экспериментальных исследований процесса получения дискретных оксидных слоев: исследования структуры и состава дискретного оксидного слоя, определения режущих свойств инструмента с оксидным слоем, исследования физико-механических свойств дискретного оксидного слоя. Комплекс экспериментальных исследований проводился в лабораторных и производственных условиях с использованием современного станочного оборудования. Изучение состава и физико-механических свойств дискретного оксидного слоя выполнялось на основе современных методов металлографического и металлофизического анализов с использованием электронно-сканирующей микроскопии.

В четвертой главе рассмотрены технологии формирования диффузионного дискретного оксидного слоя, описано оборудование для нанесения дискретного оксидного слоя на режущий инструмент и детали. В качестве материала анода

использовали вольфрам. Рассмотрение углов α наклона и расстояния L_c от сопла до обрабатываемой поверхности проводились с учетом пограничной диффузии элементов активированного воздуха для формирования тонкого оксидного слоя. Исследования по оптимизации параметров нанесения локального диффузионного дискретного оксидного слоя проводили в два этапа. На первом этапе использовали двухфакторную модель при допущении, что время является случайным фактором, для выяснения степени влияния основных параметров синтеза оксидирования на износостойкость твердосплавных пластин применительно к точению стали. На втором этапе использована математическая модель процесса нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя с учетом стохастического характера. Математическое планирование эксперимента для определения числа опытных точек и оптимального расположения их в отведенной для исследований области факторного пространства включало использование указанных параметров. Диапазон варьирования параметров выбирали таким образом, чтобы идентифицированная модель была справедлива для всей области управления, а значения параметров, находящиеся внутри диапазона, были практически реализуемы. Исходя из сказанного, использованы следующие диапазоны варьирования параметров: $I_K = 140 - 440$ мкА; $pV = 0,1 - 0,5$ МПа. Расчетные значения параметров модели осуществляли по математической программе «MOD_UNI».

В пятой главе приведены результаты изучения формирования состава и строения дискретного оксидного слоя, рассмотрено распределение концентрации элементов дискретного оксидного слоя на различных материалах, показаны заметные изменения в поверхностном слое основы. Чередование оксидов на поверхности металла связано с разным процентным содержанием кислорода. Вначале, при ионизации молекул кислорода, происходит образование гематита. Затем, по мере возрастания температуры инструмента при механической обработке деталей и 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. Таким образом, можно утверждать, что уменьшение содержания Fe в поверхностном слое обусловлено протеканием процесса окисления и образованием оксидов Fe_xO_y .

Установлено также, что на поверхности сплава BK10XOM присутствуют триоксиды вольфрама, диоксид вольфрама и оксиды кобальта, а на поверхности стали P6M5 - оксиды железа FeO , Fe_3O_4 и Fe_2O_3 . Изученный дискретный оксидный слой, состоящий из оксидов, имеющих нестехиометрическую структуру, способствует увеличению прочности поверхности инструментального материала, при этом структура основного металла не претерпевает заметных изменений в поверхностном слое. При повышении температуры оксиды переходят в более стабильное состояние, соответствующее более высокому содержанию кислорода в металле.

Представляют особый интерес результаты проведенных исследований для определения физико-механических свойств диффузионного дискретного оксидного слоя на сканирующем нанотвердомере и расчёты по этим результатам микротвёрдости основного металла (стали Р6М5) и оксидных покрытий. Оказалось, что микротвердость дискретного оксидного слоя превосходила твердость основного металла на 31%, а модуль упругости стали с дискретным оксидным слоем превышал модуль упругости стали примерно на 51%. Однако вопрос точности измерений по этой методике и расчётов по ним указанных параметров остался открытым.

Содержание **шестой главы** составляют важные для практического использования результаты экспериментальных исследований режущих свойств инструмента с пластинами из быстрорежущей стали и твердого сплава с дискретным диффузионным упрочнением. Проведены производственные испытания кинетики изнашивания резцов с пластинами из быстрорежущей стали и твердосплавных пластин с дискретным оксидным слоем и получены кривые зависимости износа от времени с соответствующими кривыми для контрольного режущего инструмента и для режущего инструмента с пластинами с покрытием TiN. Показано, что дискретный оксидный слой повышает долговечность режущего инструмента с быстрорежущей пластиной Р6М5К5 при точении стали 40Х (НВ220) в 4-5 раз по сравнению с контрольным инструментом и в 1,5-3 раз по сравнению со сплошным покрытием; режущий инструмент с твердосплавной пластиной IC50М с дискретным оксидным слоем сравнению со сплошным покрытием; режущий инструмент с твердосплавной пластиной IC50М с дискретным оксидным слоем при точении стали 40Х (НВ220) повышает долговечность в 3-4 раза по сравнению с контрольным инструментом и в 1,8-2,5 раза по сравнению со сплошным покрытием.

Установлено также, что износостойкость твердосплавных фрез ВК10ХОМ при фрезеровании титановых лопаток ВТ6 в 2 раза выше по сравнению со сплошным покрытием и в 1,8 раза выше по сравнению с контрольными фрезами при черновой обработке; в 1,5 раза выше по сравнению со сплошным покрытием и в 1,8 раза выше по сравнению с контрольными фрезами при чистовой обработке и при переточке в 2- 2,5 раза выше относительно контрольных фрез.

Таким образом, разработанная технология нанесения дискретного оксидного слоя позволяет повысить производительность инструмента, примерно, на 20% в сравнении с производительностью режущего инструмента с ионно-плазменным покрытием и на 50%, в сравнении с инструментом без покрытия.

Из описанных в шестой главе результатов не ясны причины, почему уже на стадии приработочного изнашивания наблюдается заметное снижение твердости инструмента со сплошным покрытием, в то время как для пластин с дискретным оксидным слоем отмечено полное сохранение уровня твердости локальных объемов инструмента по длине контактных площадок передней и задней

поверхностей, а на этапе конечной стадии нормального изнашивания, соответствующей наступлению катастрофического разрушения контактных площадок, отмечено удовлетворительное состояние приповерхностных слоев, сохраняющих твердость и для пластинок с дискретным оксидным слоем.

Значительные достижения по использованию в промышленности разработанной технологии восстановления лопаток на второй ресурс сталей за счет восстановления основы и упрочнения верхнего слоя описаны в главе 7. Разработана промышленная технология нанесения диффузионного дискретного оксидного слоя, которая внедрена на производстве АО «НПЦГ «Салют»» и других предприятиях авиационной промышленности со значительным экономическим эффектом. Разработка защищена патентами: №2250158РФ, №2279962РФ, №2548835РФ, №2586191РФ

В диссертации содержится решение основных вопросов поставленной научной задачи, она соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается последовательностью исследований, присутствием основной идейной линии от разработки модели процесса насыщения поверхности металла кислородом до внедрения новой технологии в производство, концептуальностью и взаимосвязью выводов.

Однако по постановке работы и трактовке основных физических процессов, обеспечивающих полученные результаты, можно сделать ряд существенных замечаний.

Замечания

1. При объяснении физических причин упрочнения и разрушения дискретных диффузионных оксидных слоёв в процессе эксплуатации не использованы общепринятые в металловедении представления о дефектах кристаллического строения металлических сплавов, теория дислокаций с точки зрения зарождения, движения и достижения их критической плотности, вызывающей образование микротрещин и разрушение.
2. Образование диффузионных окисных слоёв на поверхности и по глубине инструмента и деталей в работе не связывается с механизмами адсорбции и диффузии атомов кислорода в металлической решётке, поэтому не ясно, какие механизмы диффузии играют ведущую роль при изучаемой в работе технологии обработки коронным разрядом.
3. В заключении к диссертации утверждается что разработанная технология получения дискретных диффузионных оксидных слоёв на инструментальных и конструкционных материалах, позволяет повысить износостойкость резцов (с быстрорежущими и 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. Такое

заклучение в общем виде не достаточно обосновано и может быть справедливым только для изученных в работе сплавов и режимов резания, поскольку износостойкость является интегральным результатом не только состава сплавов и свойств покрытия, а и взаимодействия их с составом материала, условиями резания и результирующего механизма изнашивания. Однако ведущий механизм изнашивания в зависимости от типа покрытия и режимов испытания в работе не установлен, хотя известно, что основной механизм, реализуемый в процессе обработки металлов резанием, – это царапание и микрорезание.

4. В настоящее время для режущего инструмента самые распространенные покрытия резцов - нитриды и карбонитриды, например, карбонитриды титана. Сравнения с ними не приведено. Аналогично и изученные автором покрытия для лопаток компрессора. Не приведен состав покрытия. Не приведено сравнения и с используемым в настоящее время для лопаток компрессора авиадвигателей процесса ионного азотирования.

5. В работе из 7 глав только 2 посвящены собственным научным результатам. В 5-й главе "Исследование закономерностей..." приведены теоретические рассуждения по образованию оксидов железа. Они не содержат новизны в сравнении с известными теоретическими положениями физико-химии и металлургии (см., например, С.И. Попель, А.И. Сотников, В.Н. Бороненков Теория металлургических процессов, М.: Металлургия, 1986. 462 с.).

6. Текст диссертации и автореферата недостаточно отредактирован, содержит ряд грамматических ошибок, неоконченных и несогласованных фраз и слов, повторов предложений и целых абзацев, отмеченных по тексту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Указанные в п. 1, 2, 3 замечаний по работе серьёзные недостатки, хотя и заметно снижают качество рассматриваемой работы, имеют детализирующий и уточняющий характер по смежным вопросам металловедения, но не снижают общую положительную оценку этой актуальной, существенной по новизне технических решений и практической ценности результатам, получившим в основном адекватную трактовку, работы, которая является вполне законченным научным исследованием, о чем свидетельствуют приведённые акты внедрения разработанной технологии формирования дискретных диффузионных оксидных покрытий при обработке током коронного разряда, повышающей стойкость режущего инструмента и деталей компрессоров авиадвигателей из титановых сплавов.

По совокупности результатов данную работу можно классифицировать как вклад в решение крупной научно-технической проблемы – разработки

научно обоснованной технологии повышения износостойкости режущего инструмента и лопаток компрессоров авиадвигателей из титановых сплавов, реализация которой в промышленности обеспечивает большой экономический эффект.

Диссертационная работа Чекаловой Е.А. соответствует паспорту научной специальности 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Это дает основание считать диссертационную работу отвечающей требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автора – Е.А. Чекалову – заслуживающей присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Автореферат и публикации достаточно полно отражают основные положения диссертации.

Официальный оппонент, профессор кафедры металловедения
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доктор
технических наук, профессор

 (Филиппов М.А.)

Дата подписания отзыва: « 24 » декабря 2021 г.

Адрес: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

Тел. 375-44-38.

e-mail: filma1936@mail.ru

Ученый секретарь Ученого совета УрФУ





Морозова В.А.