

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора  
Куксеновой Лидии Ивановны

на диссертационную работу Ляховецкого Максима Александровича «Исследование износо- и фреттингостойкости оксидов алюминия и циркония, сформированных методом микродугового оксидирования для защиты элементов двигателей и энергоустановок», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Повышение ресурса и надежности рабочих поверхностей элементов двигателей летательных аппаратов и энергоустановок является одной из важнейших задач машиностроения. Большую роль в сокращении срока их службы играет износ рабочих поверхностей деталей в результате эрозионного, коррозионного, абразивного и/или адгезионного взаимодействия, а также усталостного разрушения.

Диссертационная работа Ляховецкого М.А. отражает эту проблему и посвящена исследованию изнашивания композиционных керамических покрытий, получаемых методом микродугового оксидирования (МДО) на алюминиевых и циркониевых сплавах, применительно к элементам двигателей летательных аппаратов (ДЛА) и энергоустановок (ЭУ).

Для продления срока службы этих изделий, в настоящее время, в производство активно внедряются различные методы повышения износостойкости их рабочих поверхностей. К одним из таких методов относится метод микродугового оксидирования (МДО), позволяющий формировать на деталях различной формы керамические покрытия, которые обладают высокими эксплуатационными свойствами.

Применение керамических материалов в качестве защитных покрытий, таких как например,  $Al_2O_3$  и  $ZrO_2$ , позволяет с одной стороны увеличить твердость поверхностного слоя и инертность к агрессивной внешней среде, а с другой изменяет механизмы взаимодействия между трущимися поверхностями, что выражается в изменении механизма разрушения и практически полном исчезновении адгезионного взаимодействия. Кроме того, при формировании на поверхности изделия керамического покрытия изменяются не только его рабочие характеристики (коэффициент трения, твердость, максимальная рабочая температура и т.д.), что обуславливает дополнительные требования к покрытию (определение его прочности и прочности сцепления с подложкой,

теплостойкость и т.д.). Все это приводит к необходимости проведения экспериментальных исследований, которые позволяют определить области применимости покрытия в требуемых условиях эксплуатации.

Поэтому рассматриваемая диссертационная работа Ляховецкого М.А., посвященная исследованию механического изнашивания МДО-покрытий при различных режимах трения в условиях возвратно-поступательного скольжения, а также в области специфического изнашивания – фреттинг-износе, является актуальной по той причине, что она определяется необходимостью повышения эффективности функционирования и безопасности эксплуатации двигателей летательных аппаратов и энергоустановок и обусловлена отсутствием отечественной научно-обоснованной методологии экспериментальных исследований фреттинг-коррозии элементов ДЛА и ЭУ.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников информации, приложений и изложена на 189 страницах (включая приложения); содержит 118 рисунков, 19 таблиц, 192 литературных источника. По материалам диссертации опубликовано 8 научных статей в рецензируемых научных журналах и изданиях. Результаты исследований неоднократно докладывались автором на научных конференциях, в том числе и международных, и поэтому известны специалистам, работающим в области исследования процесса микродугового оксидирования и трибологии. Содержание автореферата отражает результаты исследования, научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в диссертации.

**Первая глава** содержит анализ технологических возможностей повышения износо- и фреттингостойкости материалов элементов двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, а также существующие представления о механизмах износа композиционных керамических материалов. Убедительно показано, что расширение конструкторско-технологических возможностей применения алюминиевых и циркониевых сплавов для современной и перспективной авиационно-космической техники, работающей в экстремальных условиях, может быть достигнуто в результате применения технологического метода обработки поверхности изделий – метода микродугового оксидирования. Подчеркивается, что этот метод представляет собой сложный плазмохимический процесс, позволяющий формировать на поверхности алюминиевых и циркониевых сплавов керамические композиционные покрытия, которые по своим функциональным характеристикам превосходят эксплуатационные возможности покрытий, получаемых другими методами. Содержательный обзор проблемы позволил автору четко и методично сформулировать задачи исследования, в которые входит описание представлений о механизме формирования покрытий и определяющих факторов

процесса, разработки методологии исследования триботехнических характеристик при фреттинг-износе, а также рекомендации практического применения разработок.

**Во второй главе** представлены основы методологии изучения процесса изнашивания деталей элементов двигателей летательных аппаратов и энергоустановок, работающих в условиях трения и вибраций.

Показано, что основные виды сопряжений для деталей элементов ДЛА и ЭУ соотносятся с таковыми контактами, реализуемыми в лабораторных машинах трения: плоскость-плоскость, сфера-плоскость, цилиндр-цилиндр, для которых расчет напряженных состояний при контактном взаимодействии производится по теории Герца. Определены границы переходов между режимами изнашивания и установлены области реализации определенных типов изнашивания в каждом режиме. Предложены основные подходы и критерии анализа трения. Убедительно показано, что использованный в работе макромеханический подход к исследованию трибологии контактного взаимодействия (на примере контакта сфера-плоскость), позволяет описать механизмы этого взаимодействия при переходе от малоамплитудного фреттинга к возвратно-поступательному изнашиванию.

С использованием энергетического подхода были определены критерии перехода контакта от одного режима в другой, проведен детальный анализ петель гистерезиса (износа) циклов фреттинга. Применение энергетического подхода к определению режимов фреттинг-изнашивания позволило разработать рекомендации по построению карт изнашивания, а также прогнозировать объемный износ материала в зависимости от суммарной затрачиваемой энергии.

**Третья глава** содержит описание оборудования, методик и материалов исследований. Представлено обоснование выбора методов экспериментального исследования свойств и характеристик покрытий, позволяющих наиболее полно оценить их износо- и фреттингостойкости. Дано описание экспериментальной установки МДО и исследуемых методик по определению оптимальных режимов и геометрии формируемых покрытий. Для реализации разработанных физических моделей и методик оценки изнашивания МДО-покрытий, спроектирована, изготовлена и оснащена измерительной аппаратурой универсальная машина трения, позволяющая проводить исследования контактного взаимодействия в широком диапазоне материалов, геометрических форм и нагрузок. Следует особенно подчеркнуть, что диссертант освоил большой комплекс современных методов исследования свойств материалов механических характеристик, коррозионных свойств, структуры и состава. Разработана специальная машина трения для оценки износостойкости в условиях реверсивного движения и фреттингостойкости.

Модернизирована экспериментальная установка микродугового оксидирования для обеспечения формирования качественного покрытия.

Подход к подбору экспериментального оборудования существенно обогатил общую методологию изучения контактных явлений в элементах двигателей летательных аппаратов и энергоустановок, которую предложил автор диссертационной работы и которую трудно переоценить.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментального исследования по формированию оксидов алюминия и циркония методом микродугового оксидирования и реализации их свойств в условиях триботехнических испытаний. Первое, что выделяет данную часть работы – это ее фундаментальность, скрупулезность и методичность. Владея широким комплексом подходов, экспериментальных методик и в целом разработанной методологией исследования, автор получил ряд существенных результатов. Среди них параметры оптимизации процесса оксидирования, оптимальные составы электролитов, характеристики роста покрытий. Особого внимания заслуживает методика построения карт износа и фреттинг-износа деталей с определением областей и механизмов разрушения покрытий; использование энергетического подхода к изучению процесса изнашивания, который позволил определить критерий перехода из режима интенсивного разрушения МДО-покрытий в экстремальный. Определен энергетический коэффициент износа, позволяющий прогнозировать объемный износ МДО-покрытий при различных режимах нагружения.

**Пятая глава** посвящена результатам реализации разработок диссертационной работы в промышленной практике. В основном практическая реализация связана с опытными технологическими процессами.

Разработан опытный технологический процесс и оптимальные режимы формирования керамического покрытия на образцах из алюминиевого сплава АК4-1; результаты использованы для защиты от износа и фреттинг-износа детали (стакана подшипника) блока насосов авиационного двигателя РД-33 серии 4 (ОАО «ММП им. В.В. Чернышева»).

Нашли практическое применение результаты сравнительных испытаний износостойкости материалов пары трения: сталь ШХ15 и алюминиевый сплав АК4-1 с МДО-покрытием и без в условиях возвратно-поступательного скольжения в среде различных масел, используемых в агрегатах масляной системы авиационных двигателей АЛ 31Ф и АЛ41Ф (НТЦ «ОКБ им. А.Люлька»).

Рекомендованы опытные технологические процессы формирования МДО-покрытий, результаты анализа и методики построения карт износа и фреттинг-износа

алюминиевых сплавов с Д16 и АК4-1 для использования в опытно-конструкторских разработках свободно-поршневых двигателей комбинированных энергоустановок и энергоустановок на основе поршневых двигателей Стирлинга (НПЦ «Силовые агрегаты» МГМУ МАМИ).

Используется опытный технологический процесс и рекомендации по формированию оксидных покрытий методом МДО на образцах из циркониевого сплава для целенаправленного формирования диоксида циркония заданного фазового состава с преобладанием тетрагональной фазы (НПЦ «Трибоника»).

Разработаны опытные технологические процессы формирования комбинированных МДО-покрытий на циркониевом сплаве, их эксплуатационные характеристики для узлов трения космической энергетической установки (ОАО «Красная Звезда»).

Внедрены метод МДО для защиты от коррозии и фреттинг-износа элементов ядерных энергоустановок, изготавливаемых из циркониевых сплавов, состав многокомпонентного электролита и режимы опытных технологических процессов, в два раза повысивших коррозионную стойкость циркониевого сплава и позволивших получить диоксиды циркония заданного фазового состава, а также результаты их фреттинг-изнашивания (Институт промышленных ядерных технологий НИЯУ МИФИ).

Акты о внедрении результатов научных исследований диссертационной работы М.А. Ляховицкого содержатся в приложениях.

В целом можно заключить, что диссертация М.А. Ляховецкого является законченной научно-квалификационной работой и выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ Московского авиационного института (национального исследовательского университета) МАИ.

**Наиболее существенные научные результаты, полученные автором:**

– использование комплексного подхода к разработке и научному обоснованию методов повышения износо- и фреттингостойкости композиционных керамических покрытий на основе оксидов алюминия и циркония, получаемых методом микродугового оксидирования для элементов двигателей летательных аппаратов и энергоустановок;

– методология исследования изнашивания в условиях фреттинга и возвратно-поступательного движения применительно к элементам двигателей летательных аппаратов и энергоустановок, включающая физические модели процессов механического изнашивания и фреттинг-изнашивания, регрессионные модели связи служебных характеристик покрытий с параметрами технологии;

– экспериментальные закономерности изнашивания алюминиевых и циркониевых сплавов с покрытиями, полученными методом микродугового оксидирования, применительно к условиям эксплуатации узлов трения двигателей летательных аппаратов и энергоустановок, включающие выявленные границы областей с различными типами разрушения покрытий, карты износа и фреттинг-износа для МДО-покрытий, критерии энергетического подхода для оценки процесса трения МДО-покрытий, основанные на регистрации и анализе гистерезиса при построении графиков зависимости силы трения и перемещения в контакте.

### **Новизна и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**

*Научная новизна* заключается в разработке и обосновании методологии изучения износо- и фреттингостойкости оксидов алюминия и циркония применительно к условиям эксплуатации узлов трения элементов двигателей летательных аппаратов и энергоустановок, направленное на повышение их ресурса, безопасности и надежности.

*Достоверность* результатов подтверждается:

– обеспечением экспериментальных исследований современными средствами измерений, калибровки измерительных каналов и своевременными метрологическими поверками; тщательностью проведенных комплексных экспериментальных исследований, хорошей повторяемостью результатов исследования механических и физических свойств, получаемых в одинаковых условиях эксперимента композиционных керамических покрытий, корреляцией разработанных моделей механического изнашивания МДО-покрытия при возвратно-поступательном скольжении с существующими представлениями о разрушении керамических материалов отечественных и зарубежных исследователей; соответствием лабораторных и натурных результатов, полученными актами практического использования результатов диссертации.

*Значение для теории и практики* имеют расчетное-экспериментальное обоснование износо- и фреттингостойкости оксидов алюминия и циркония, сформированных методом микродугового оксидирования узлов трения двигателей летательных аппаратов и энергоустановок; необходимые факторы для прогнозирования износостойкости композиционных керамических оксидов, определенных экспериментально и на основе физического моделирования. Полученные результаты внедрены в опытно-конструкторские работы ряда предприятий, занимающихся проектированием и изготовлением двигателей летательных аппаратов и энергоустановок.

## **Соответствие критериям, которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени**

Диссертация Ляховецкого Максима Александровича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научно-технической задачи – создания методологии исследования и получения результатов, необходимых для разработки научно-обоснованных методов повышения износо- и фреттингостойкости композиционных керамических покрытий на основе оксидов алюминия и циркония для элементов двигателей летательных аппаратов и энергоустановок.

### **Замечания**

1. Известно, что покрытия, полученные методом микродугового оксидирования, имеют существенный недостаток: при их формировании создается внешний пористый слой, который ухудшает эксплуатационные характеристики покрытий, поэтому возможность использования этих покрытий часто бывает связана с необходимостью механической обработки. В то же время известны работы, проводимые под руководством проф. Малышева В.Н., в которых пористость покрытий переводится в разряд достоинств и улучшает триботехнические покрытия путем заполнения порового пространства сверхвысокомолекулярным полиэтиленом, который при трении работает как антифрикционный композиционный материал. Автор диссертации подтвердил это явление при решении задачи практики путем нанесения твердых смазочных покрытий с  $\text{MoS}_2$ , хотя механизм влияния этого покрытия иной. К сожалению, явление известного метода «залечивания» пористости МДО-покрытий при разработке методологии исследования не нашло отражения в работе Ляховецкого М.А.

2. Автор использует большое количество разнообразных методик металлофизического исследования покрытий. Из комплекса параметров явно видны характеристики, которые могли бы служить структурными критериями состояния и свойств покрытий; они могли бы органично войти в весь методологический аспект работы. Это свидетельствует о том, что возможности используемой автором приборной техники реализованы далеко не полностью.

В целом, замечания носят характер пожеланий на последующую научную деятельность, область которой ярко очерчивает представленная работа. Замечания не изменяют общей высокой положительной оценки.

### **Заключение**

Диссертационная работа Ляховецкого М.А. характеризуется достаточно высоким методическим, научным и практическим уровнем. Она представляет новый

методологический подход в изучении проблемы изнашивания элементов двигателей летательных аппаратов и энергоустановок. Разносторонние теоретические и экспериментальные данные, достоверность и обоснованность основных научных положений и выводов дают основание заключить, что рассматриваемая диссертационная работа является законченным научным исследованием. Содержание диссертации обладает внутренним единством и четко свидетельствует о личном вкладе автора в науку.

Поэтому диссертация Ляховецкого Максима Александровича отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Официальный оппонент  
Заведующая лабораторией  
Методов и технологий упрочнения  
ФГБУН «ИМАШ им. А.А. Благонравова» РАН,  
доктор технических наук, профессор

*Меркушова*  
25.11.14г.

Куксенова Лидия Ивановна

101990, г. Москва, Малый Харитоньевский пер. д.4  
тел. 8 (499) 135-89-16  
e-mail: [lkukc@mail.ru](mailto:lkukc@mail.ru)

Подпись Куксеновой Л.И. заверяю



*по кафедре  
ИМАШ (Л.И. Бурцева)*