

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора ГНЦ

ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

..... д.т.н., Ю.А. Ножницкий

*Ю.А. Ножницкий* 2014г.



ОТЗЫВ

ведущей организации – Государственного научного центра ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» на диссертационную работу Ляховецкого Максима Александровича «Исследование износо- и фреттингостойкости оксидов алюминия и циркония, сформированных методом микродугового оксидирования для защиты элементов двигателей и энергоустановок», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

#### Актуальность темы

В изделиях авиационно-космической техники большое количество деталей изготавливается из алюминиевых сплавов, традиционно защищаемых покрытиями, сформированными методом анодирования. Кроме того, широкое применение находят покрытия на основе оксидов алюминия и циркония, используемых в условиях высоких температур. Среди методов получения защитных покрытий все большее распространение получает метод микродугового оксидирования (МДО), позволяющий формировать композиционные оксидные покрытия на металлах и сплавах «вентильной» группы, к которым относятся алюминиевые и циркониевые сплавы. Формируемые таким образом покрытия по всем эксплуатационным характеристиками превосходят покрытия, получаемые методом анодирования, однако данных по износостойкости и фреттингостойкости МДО покрытий и механизмам их механического изнашивания на настоящий момент явно недостаточно.

В диссертации автором на основе анализа механизмов разрушения покрытий разработаны методики оценки их ресурса и определены области их нормальной работы при износе и фреттинг-износе, что позволяет предоставлять конструкторам необходимую информацию для проектирования узлов трения ДЛА и ЭУ с оксидными покрытиями. Таким образом, тема диссертационной работы является весьма актуальной.

## Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка принятых сокращений, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 179 страницах текста, содержит 118 рисунков, список использованных источников состоит из 192 наименований на 15 страницах и приложений на 8 страницах.

*Во введении* обоснована актуальность выбранной темы исследования, приведена основная характеристика работы, сформулирована цель и задачи исследования.

*В первой главе* проводится аналитический обзор работ и анализ использования алюминиевых и циркониевых сплавов и их оксидов в ДЛА и ЭУ, рассмотрены технологические возможности используемых на производстве методов повышения их износо- и фреттингостойкости, обоснован выбор метода МДО. Показано, что вопросами износа и особенно фреттинг-износа оксидной керамики и покрытий в отечественной и зарубежной литературе уделено недостаточное внимание, сформулированы задачи исследования.

*Вторая глава* посвящена анализу и моделированию процессов механического изнашивания в условиях трения и вибрации. Рассмотрена схема исследуемого в работе узла трибоконтакта и режимы трения, включающие фреттинг-износ и классическое изнашивание при возвратно-поступательном скольжении. Показаны возможности и преимущества энергетического подхода к анализу изнашивания, сформулированы принципы построения карт износа и фреттинг-износа и возможности разработанных методик на их основе.

*В третьей главе* рассмотрены использованные в работе методические вопросы формирования покрытий и исследования их физико-химических и эксплуатационных свойств. Особое внимание уделено составу и структуре машины трения, используемой для изучения износостойкости и фреттингостойкости керамических оксидных покрытий

*В четвертой главе* приведены результаты получения оптимальных МДО покрытий на алюминиевых сплавах Д16 и АК4-1, и детально рассмотрен процесс МДО на циркониевом сплаве Э110. Также в главе приведены результаты испытаний полученных покрытий на сопротивление износу, фреттинг-износу и коррозии. Определены границы перехода между режимами фреттинга и перехода от фреттинга к изнашиванию при возвратно-поступательном скольжении, что позволило построить карту фреттинга для МДО покрытия. Изучение характера разрушения покрытия и определение значений объемного износа при различных нормальных нагрузках и перемещениях были построены карты износа. С использованием энергетического подхода и анализа выражения для

энергетического коэффициента износа покрытия предсказан его объемный износ на сплаве Д16 в заданных условиях нагружения и выбранной области повреждаемости покрытия в зависимости от рассеиваемой энергии в контакте.

*В пятой главе* приводятся результаты разработки и реализации опытных технологических процессов применительно к деталям Д и ЭУ, выполненным из алюминиевых и циркониевых сплавов.

*В заключении* автор приводит выводы о проделанной работе и выработанных рекомендациях по повышению износо- и фреттингостойкости узлов трения ДЛА и ЭУ путем использования МДО покрытий, обеспечивающих ресурс и надежность таких узлов.

**Научная новизна и значимость полученных результатов работы** заключается в определении оптимальных режимов процесса МДО для повышения износо- и фреттингостойкости рабочих поверхностей узлов трения с композиционными керамическими покрытиями, разработке модели изнашивания таких покрытий и построении карты износа и фреттинг-износа для МДО покрытия на алюминиевом сплаве, определении границ перехода между различными режимами изнашивания. С использованием энергетического подхода определен коэффициент износа, позволяющий предсказывать значения объемного износа покрытий, что в конечном итоге позволяет оценить ресурс покрытия. Подтверждена возможность формирования коррозионно- и износостойких покрытий на циркониевом сплаве.

#### **Значимость полученных результатов.**

Результаты и разработанные технологические процессы можно рекомендовать к широкому использованию для повышения ресурса и надежности Д и ЭУ. Предложенные модели и методики являются значимыми для развития не только авиационно-космической науки, но и для других отраслей машиностроения.

#### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.**

Полученные в ходе проведения расчетных оценок и экспериментального исследования результаты могут найти практическое применение в различных конструкторских бюро и предприятиях, занимающихся проектированием и исследованием Д и ЭУ. Так, например, результаты по формированию защитных покрытий методом МДО на алюминиевых и циркониевых сплавах, могут иметь практическое использование, как на предприятиях авиационно-космической промышленности в качестве защиты элементов агрегатов силовых установок и корпусных деталей, так и общего машиностроения. Разработанная методика исследования изнашивания композиционного керамического

покрытия, полученного с помощью метода МДО, может быть использована, в первую очередь, для исследования механизмов изнашивания других керамических материалов, работающих в условиях вибрации, а также для выработки рекомендаций допустимых режимов работы таких материалов.

Практическое использование результатов диссертационной работы отражено в актах об использовании, представленных в приложении к диссертации.

**Степень обоснованности и достоверности научных положений**, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертационной работе, обусловлена использованием общеизвестных фундаментальных законов, последовательным изложением хода исследования, подтверждается результатами экспериментальных исследований и корректностью использования математических методов планирования эксперимента. Полученные автором результаты прошли апробацию на российских конференциях и научных семинарах, а также нашли применение на промышленных предприятиях.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

— полученные в работе результаты экспериментальных исследований и численных оценок не проанализированы с позиции контактной усталости, контактной выносливости;

— модель процесса изнашивания при фреттинге предполагает наличие так называемого смешанного режима с вероятностью образования трещин, однако это режим не нашел подтверждения в экспериментальной части работы;

— исследование и анализ пятен и продуктов износа, к сожалению, проведены без использования современных аналитических методов определения состава и структуры.

Приведенные замечания, однако, не препятствует положительной оценки диссертационной работы.

#### **Общая оценка диссертационной работы.**

Актуальность темы диссертационной работы подтверждена, материал диссертации изложен логично, последовательно и аргументировано, редакционных замечаний, кроме некоторых мелких опечаток, не имеется.

Результат диссертационной работы являются значимыми для развития авиационно-космической отрасли промышленности страны и могут быть использованы предприятиями отрасли на этапах разработки. По теме диссертационной работы автор имеет 8 публикаций, все в рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК РФ. Результаты работы докладывались на научных конференциях, в

сборниках трудов этих конференций опубликовано 18 работ, поэтому они известны специалистам, работающих в области исследования покрытий, получаемых методом МДО.

### Заключение

Диссертационная работа Ляховецкого Максима Александровича «Исследование износо- и фреттингостойкости оксидов алюминия и циркония, сформированных методом микродугового оксидирования для защиты элементов двигателей и энергоустановок» является законченной научно-обоснованной квалификационной работой в которой на основании проведенного автором исследования изложены технические решения по повышению ресурса и надежности деталей и узлов трения Д и ЭУ, изготавливаемых из алюминиевых и циркониевых сплавов. Выполненные методические разработки имеют существенное значение для использования их при проектировании современных и перспективных Д и ЭУ, имеющих в своем составе керамические детали и детали из алюминиевых и циркониевых сплавов с покрытиями. Эти разработки характеризуются новизной и подтвержденной практической значимостью.

Содержание автореферата соответствует основному содержанию и выводам диссертации. По научному уровню полученных результатов, содержанию и оформлению диссертационная работа соответствует требованиям и критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ для диссертационных работ на соискание ученой степени кандидата наук, а автор диссертации Ляховецкий Максим Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Отзыв на диссертацию и автореферат рассмотрен и одобрен на заседании секции НТС ГНЦ ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», протокол № 9 от 25 ноября 2014 года.

Отзыв подготовил начальник сектора  
«Сопротивление усталости конструкционных материалов и деталей ГТД»

д.т.н. профессор Петухов А.Н. ....  .....