

## Отзыв

официального оппонента

кандидата технических наук, Климова Вадима Геннадьевича

на диссертационную работу Николаева Ильи Алексеевича

«Повышение фреттингостойкости элементов двигателей летательных аппаратов и энергетических установок с использованием твердых смазочных покрытий», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»  
(технические науки).

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Ресурс элементов газотурбинных двигателей воздушных судов и энергетических промышленных установок во многом связан с износом деталей. Помимо случаев, связанных с авариями по причинам эксплуатационного характера, в авиационной отрасли во многих узлах трения весьма распространена фреттинг-коррозия.

Фреттинг развивается в различных узлах трения: на поверхностях контакта бандажных полок лопаток, в поворотных узлах направляющих аппаратов, в замках лопаток вентилятора, компрессора, турбины, на рабочих поверхностях шлицевых соединений, в посадочных местах подшипников качения, в резьбовых соединениях, в отверстиях под болты и пр. Из имеющейся практики современной эксплуатации двигателей отечественной военной авиации фреттинг-коррозии часто подвергаются детали имеющие высокую стоимость и длительный цикл воспроизводства, что значительно усугубляется низкой степенью внедрения ремонтных технологий по причине длительных процедур внедрения новых процессов, установленных нормативной документацией.

Существуют примеры массовой отбраковки (до 60%) лопаток ротора компрессора двигателей типа Д-30КП по причине повышенной степени износа замковых соединений вследствие фреттинга. Также по причине микровибраций на протяжении значительного количества времени существует проблема износа бандажных полок рабочих лопаток вентилятора двигателя Д-18Т, усугубленная

выявлением массовых микротрещин в зоне плоского контакта. Есть также общеконструктивные проблемы зигзагообразных соединений бандажных полок лопаток ротора турбины многих газотурбинных двигателей разработки ЗМКБ «Прогресс им. А.Г. Ивченко», проявляющихся в виде появлений трещин в местах контакта угловых пар трения.

Указанные проблемы оказывают значительное влияние на возможность продления межремонтных ресурсов двигателей и значительно удорожают проведение капитальных ремонтов вследствие того, что за межремонтный цикл многие подобные детали приходят в полную негодность без возможности их восстановления по причине превышения уровня износа. Классические антифрикционные покрытия на базе гальванического серебра и шликерных графитовых обмазок, применяемые в текущем производстве, не позволяют поддерживать длительную эксплуатацию в межремонтном цикле без их своевременного восстановления по причине ограниченности срока службы.

Существует множество методов защиты деталей от фреттинга, но также известно, что стойкость к фреттингу контактирующих деталей в значительной степени определяется механическими и термодинамическими свойствами их поверхностных слоёв, поэтому модификация поверхностных слоев или замена их на фреттинго-стойкие слои покрытий, а также твердые смазочные покрытия, позволяет надеяться на увеличение стойкости материалов к фреттингу на протяжении длительного количества времени без их восстановления. Высокой актуальностью обладают разработки новых типов покрытий, позволяющих увеличить цикл межремонтного ресурса изделий. Данная задача будет являться одной из ключевых на рубеже развития авиационной отрасли до 2050 года и основной для завоевания превосходства на мировом рынке фронтовой, транспортной и гражданской авиации.

На основании изложенного, работа автора, посвященная повышению фреттингостойкости элементов двигателей воздушных судов и энергетических промышленных установок с использованием твердых смазочных покрытий, является **актуальной**.

Решение данной задачи позволит увеличить ресурс и надежность элементов двигателей воздушных судов и промышленных установок.



Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и 6-ти приложений.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

На основании результатов достаточного количества экспериментальных исследований автором сделаны обоснованные выводы, предложена методика выбора покрытий, стойких к фреттинг-коррозии, разработаны рекомендации по применению новых технических решений на предприятиях авиакосмической отрасли.

### **Достоверность полученных результатов**

Корректным использованием методов математической статистики, проверкой полученных результатов на изделиях авиакосмической отрасли и решением поставленных задач согласно актов использования, полученных от организаций-заказчиков. Опубликованные автором работы не противоречат работам других авторов.

### **Научная новизна полученных результатов**

Научная новизна работы заключается в применении петель гистерезиса к разработанным покрытиям и определению преобладающих механизмов изнашивания, величины рассеянной энергии в контактах пар трения при различных условиях их работы. По форме петель гистерезиса определены коэффициенты и индексы скольжения, энергетические коэффициенты, коэффициенты объемного износа рекомендуемых покрытий, построены карты фреттинга. Разработана оригинальная методика выбора твердых смазочных покрытий стойких к фреттингу. По характеру методики можно сделать вывод, что она применима для выбора и оценки прочих износостойких покрытий.

### **Практическая значимость**

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке методики выбора описываемых покрытий, стойких к фреттинг-изнашиванию, и разработке рекомендаций по применению новых технических решений:

1. Полученные плазменным напылением многослойные покрытия рекомендованы для защиты замковых соединений вентиляторных лопаток ГТД

от фреттинга и защиты узлов поворота системы управления механизацией компрессора низкого давления от износа.

2. Керамикоподобные покрытия рекомендованы для защиты от износа внутренней поверхности корпуса капиллярного насоса и для защиты от заедания резьбовых поверхностей элементов системы обеспечения теплового режима космических аппаратов.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Пункт научной новизны, а именно «работоспособность и фреттингостойкость разработанных ТСП подтверждена на практике» не относится к научной новизне. Данный целесообразно переместить в практическую значимость.

2. Необходимо уточнить цель применения керамикоподобных покрытий в защите резьбовых соединений деталей в системе обеспечения теплового режима космических аппаратов вместо классических смазок.

3. Отсутствуют значения адгезии исследуемых покрытий, как одна из основных характеристик подобных материалов при эксплуатации в узлах трения.

4. В работе не совсем четко представлена последовательность центральной линии исследования.

5. Для более полной оценки преимуществ предлагаемых покрытий было бы целесообразно представить сравнительный анализ результатов применения в том числе прочих классических распространенных методов из текущего производства (серебрение и пр.).

6. В тексте работы встречаются стилистические и грамматические неточности.

Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку работу, не снижают ее научной новизны и практической ценности.

**Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.**

Диссертационная работа Николаева Ильи Алексеевича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне. На основе большого количества самостоятельно проведенных экспериментом



