

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Хопина Петра Николаевича «Комплексная оценка триботехнических показателей сопряжений с твёрдосмазочными покрытиями», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.04 - Трение и износ в машинах

1. Актуальность избранной темы.

Ряд ответственных узлов трения авиационно-космической техники автономно функционирует в экстремальных условиях космического вакуума при воздействии различного рода облучений, экстремальных нагрузок, повышенной и пониженной температуры. В этих условиях наблюдается интенсивное испарение смазочных материалов, что, с одной стороны, приводит к ухудшению их смазочных характеристик, а, с другой стороны, вызывает загрязнение ответственных поверхностей оптических приборов и электронной техники. Для смазывания таких сопряжений используются твёрдосмазочные покрытия на основе дисульфида молибдена со связующими компонентами. В настоящее время ставится задача обеспечения работоспособности таких сопряжений до 10-15 лет. Прогнозирование триботехнических показателей указанных узлов трения в настоящее время затруднена вследствие отсутствия математического аппарата, учитывающего одновременное произвольное сочетание нагрузочно-скоростных параметров сопряжений различного состава. Именно эта задача решается в представленной работе, что определяет её актуальность.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Работа базируется на теоретических и экспериментальных исследованиях на базе современных представлений теории трения и изнашивания, регрессионного и дисперсионного анализов, теории планируемого эксперимента. Кор-

ректность полученных комплексных моделей подтверждена сравнениями с результатами ведущих исследователей в данной области. Отдельные положения диссертации докладывались и обсуждались на семинаре кафедры «Прикладная физика» Тверского государственного технического университета в 2014г., на семинаре по механике фрикционного взаимодействия твёрдых тел им. И.В. Крагельского в ИПМех РАН в 2015г., на научном семинаре по трению и износу в машинах им. М.М. Хрущёва в ФБГУН ИМАШ РАН в 2015г. и в 2017г., на XI международной научно-технической конференции «Трибология - машиностроению» ИМАШ РАН в 2016г., на IX и X Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (ВИАМ) в 2017 и 2018 г.г.

3. Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность результатов подтверждается экспериментальными исследованиями, применением современных технических средств при анализе, приемлемой сходимостью теоретических и эмпирических результатов, а также реализацией результатов исследований в промышленности.

Основные положения и наиболее важные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах ведущих организаций, специализирующихся в области трения, износа и смазочных материалов: в Тверском государственном техническом университете, в ИПМех РАН, в ФБГУН ИМАШ РАН, на международных конференциях «Трибология - машиностроению» в ИМАШ РАН, на IX и X Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (ВИАМ) в 2017 и 2018 г.г., в Ростовском государственном университете путей сообщения в 2018г.

В результате проведённой работы на ряде авиационно-космических и других предприятий осуществлено проектирование, изготовление и внедрение установок и методик для оценки триботехнических показателей узлов

трения с применением твёрдосмазочных покрытий для условий нормальной атмосферы и вакуума (ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» (КБ «Салют»), ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», ФГУП ММПП «Салют»; п/я Р-6601; БЕЛАЗ, Беларусь, г. Жодино.). Внедрение полученных решений позволило получить экономический эффект за счёт повышения производительности и снижения трудозатрат при проведении испытаний агрегатов изделия свыше 25 тыс. рублей в ценах 1982г.

4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов:

- выявлены закономерности влияния нагрузочных и скоростных режимов трения сопряжений с ТСП для широкого диапазона их изменений на эксплуатационную температуру при трении, а также получены регрессионные зависимости интенсивности изнашивания от температуры ТСП различных составов применительно к нормальным атмосферным условиям и условиям вакуума;
- разработан метод, позволяющий, исходя из результатов планируемого эксперимента, в котором параметром оптимизации принята температура трения, а влияющим факторами являются скорость скольжения и контактное давление, оценивать предельные и оптимальные нагрузочно – скоростные режимы трения сопряжений с ТСП, получать на основании математических моделей зависимости для оценки предельных и оптимальных режимов трения;
- выявлены закономерности влияния эксплуатационной температуры на коэффициент трения для нормальных атмосферных условий и условий вакуума;
- создан расчётный метод комплексной оценки триботехнических показателей пар трения, основанный на проведении математического планируемого эксперимента, в котором используются имеющиеся в литературе однофакторные зависимости. В результате реализации математических планируемых экспериментов типа ПФЭ 2^6 (64 опыта) и центрального ротатбельного композиционного плана 2 порядка для 5 факторов, состоящего из 52 опытов, для

сопряжений с ТСП получена модель для расчёта интенсивности изнашивания в нормальных атмосферных условиях фрикционных сопряжений с ТСП на основе MoS_2 с органическим связующим в зависимости от скорости скольжения, нагрузки, толщины ТСП, шероховатости основы и твёрдости контртела.

5. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

В данной диссертации автором:

- созданы методики и получены математические модели, позволяющие на стадии конструкторской подготовки производства с достаточной для практики точностью рассчитать для нормальных атмосферных условий, вакуума и повышенной температуры триботехнические показатели сопряжений с ТСП различных составов;
- рекомендовано для нормальных атмосферных условий при низких контактных давлениях ($P = 11-18$ МПа) и скоростях скольжения $V < 0,4$ м/с использовать самосмазывающиеся материалы (СМ) типа углеграфитового АТГ, наполненных фторопластовых антифрикционных материалов ГФ-5М, ВОЛАН-Ф, КВП-1, графитопласта АМС-5М, которые обладают меньшим коэффициентом и температурой трения, чем пара с ТСП ВНИИ НП 212, а при более напряжённых режимах трения - пар с ТСП ВНИИ НП 212, которые оказались также более предпочтительными для работы в условиях вакуума (за исключением СМ АТГ) для диапазона температур трения от 40 до 200°С.
- разработаны эффективный способ существенного снижения "стоп-эффекта" за счёт использования материала контртела с более выраженными пластическими свойствами и более точный по сравнению с имеющимися способ контроля времени приработки (а.с. 1059485).
- определены технологические рекомендации и выбран оптимальный тип покрытия ВНИИ НП 212М, сохранившего свои смазочные свойства даже после пребывания в атмосфере соляного тумана в течение 7 суток;
- реализованы положительные результаты исследований в промышленности

и получен экономический эффект на сумму свыше 25 тыс. рублей в ценах 1982г.

6. Оценка содержания диссертации, ее завершенность.

Диссертационная работа в себя включает:

- выявленный на основе теоретических и экспериментальных исследований вывод о том, что ресурс работы сопряжений с ТСП определяется ресурсом связующих составляющих;
- модель для расчёта интенсивности изнашивания в нормальных атмосферных условиях фрикционных сопряжений с ТСП на основе MoS_2 с органическим связующим в зависимости от скорости скольжения, нагрузки, толщины ТСП, шероховатости основы и твёрдости контртела, полученную в результате реализации предложенного расчётного метода комплексной оценки триботехнических показателей пар трения, основанного на проведении математического планируемого эксперимента, в котором используются имеющиеся в литературе однофакторные зависимости;
- универсальные регрессионные зависимости температуры трения от нагрузочно - скоростных параметров работы сопряжений с ТСП;
- регрессионные зависимости интенсивности изнашивания от температуры трения сопряжений с ТСП различных составов для нормальной атмосферы и вакуума;
- модели применительно к ТСП различных составов для оценки коэффициента трения трибосопряжений, функционирующих в условиях нормальной атмосферы и вакуума;
- зависимости, позволяющие для трибосопряжений с ТСП ВНИИ НП 212 определять сочетания оптимальных и предельных режимов трения по скорости скольжения и контактному давлению, полученные в результате реализации впервые предложенного и экспериментально опробованного для пар трения с ТСП оригинального метода определения предельных и оптимальных нагрузочно - скоростных режимов трения смазочных материалов;

- нелинейные математические модели, адекватно описывающие влияние нагрузочно-скоростных факторов на коэффициент трения и контактную температуру сопряжений с ТСП ВНИИ НП 212 в нормальных атмосферных условиях, на коэффициент трения при повышенной температуре, а также на коэффициент трения и контактную температуру рассматриваемых фрикционных сопряжений в вакууме;
- вывод о том, что самосмазывающиеся материалы углеграфитовый антифрикционный материал АТГ, наполненные фторопластовые антифрикционные материалы ГФ-5М, ВОЛАН-Ф, КВП-1, графитопласт АМС-5М по теплофрикционным показателям превосходят сопряжения с ТСП в условиях нормальной атмосферы при температуре трения ниже 80-100°С, при более напряжённых режимах и в вакууме лучшими показателями обладает ТСП;
- более точный по сравнению с имеющимися способ контроля времени приработки, а также эффективный способ существенного снижения "стоп-эффекта" за счёт использования материала контртела с более выраженными пластическими свойствами, т.е. меньшей твёрдости.
- заключение о том, что в атмосфере соляного тумана приработанные образцы с ТСП оказались практически неработоспособными после воздействия указанной атмосферы, а для неприработанных сопряжений лучшие триботехнические показатели в целом обнаружило ТСП ВНИИ НП 212М, сохранившее свои смазочные свойства даже после пребывания в атмосфере соляного тумана в течение 7 суток.

Диссертация является завершённой работой и состоит из введения, шести глав, основных результатов и выводов, списка использованной литературы, содержащего 175 источников, и приложений. Работа изложена на 313 страницах, содержит 128 рисунков и 50 таблиц.

7. Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации, мнение о научной работе соискателя в целом.

Необходимо отметить высокий уровень самостоятельности соискателя учёной степени доктора технических наук Хопина Петра Николаевича в связи

с тем, что значительное количество публикаций сделаны единолично.

К числу замечаний по диссертации можно отнести следующие.

1. В диссертации и автореферате рассматривается схема трения чистого скольжения в то время, как многие узлы трения реальных сопряжений функционируют в условиях реверсивного возвратно-вращательного или возвратно-поступательного движения.
2. В диссертации автор приводит зависимость (3.15) ресурса пары с ТСП (в автореферате зависимость (1)), в которой помимо нагрузочно-скоростных факторов описано влияние ряда технологических параметров (твёрдости контртела, толщины ТСП, высоты неровностей основы по 10 наибольшим точкам), которые не учитываются в других моделях, предлагаемых автором для оценки триботехнических показателей сопряжений с ТСП.
3. В автореферате и диссертации используются различные термины для оценки температурного состояния контакта: температура трения (зависимость (3.18) на стр. 146, зависимость (3.22) на стр. 154 и др. в диссертации) и температура поверхности контакта (зависимости (3), (5) автореферата).
4. На рис.3.32 (графическая интерпретация корректировки регрессионной зависимости $f_{тр.}=f(T_{тр.})$ для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 с учётом литературных данных) значение коэффициента трения, рассчитанное автором для литературных данных при $T_{тр.}=12^{\circ}\text{C}$, указано для установившегося режима трения в то время, как указано на стр.159, через 15 месяцев эксплуатации пары с ТСП в условиях космоса это значение снизилось до 0,03-0,04.
5. Учитывая важность явления «стоп-эффекта» и приработки для узлов, функционирующих в условиях вакуума, желательно было отразить этот вопрос в работе.
6. При сравнительном анализе триботехнических характеристик пар трения с ТСП и самосмазывающихся материалов желательно было провести сравнительные исследования интенсивности изнашивания указанных смазочных материалов и n-вариантное физико-математическое моделирование.

8. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

Таким образом, диссертация Хопина Петра Николаевича является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения важной задачи комплексной оценки триботехнических показателей сопряжений ответственных узлов авиационно-космической техники с твердосмазочными покрытиями, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие экономики страны и повышение её обороноспособности, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры «Транспортные машины и триботехника» Дорожно-строительного факультета ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», почтовый адрес: 334038, г. Ростов - на - Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2; телефон 8-918-557-50-80-, адрес электронной почты: tmt@rgups.ru

(подпись)

/Шаповалов Владимир Владимирович/

(расшифровка подписи)

Подпись *Шаповалов В.В.*

Дата:

УДОСТОВЕРЯЮ
Зам. Начальника управления делами
ФГБОУ ВО РГУПС

« 31 » 10 2014

Э.Н. Кирсанова