

ОТЗЫВ
официального оппонента
Скотниковой Маргариты Александровны
на диссертационную работу
Хопина Петра Николаевича
на тему «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"
г. Москва 2018 г.

Диссертационная работа **Хопина П.Н.** посвящена разработке методов комплексной оценки триботехнических показателей сопряжений с твердосмазочными покрытиями для узлов изделий аэрокосмической техники с учетом модификации состава покрытий, а также влияния условий эксплуатационных факторов применительно к различным условиям функционирования.

Известно, что безотказная работа современных высокотехнологичных конструкций определяется надёжностью функционирования отдельных агрегатов и, в том числе, ответственных узлов трения различных механизмов, автономно функционирующих как в нормальной атмосфере, так и в высоком вакууме при воздействии различного рода облучений, экстремальных нагрузок, повышенной температуры и других факторов. Наиболее широко для смазки рассматриваемых узлов трения применяются твёрдосмазочные покрытия (ГСП) типа ВНИИ НП, ВАП. Эти вопросы широко освещены в научной литературе.

До последнего времени в подавляющем большинстве проведённых исследований удавалось получать лишь однофакторные зависимости интенсивности изнашивания, ресурса или коэффициента трения фрикционных соединений с ТСП от одного из факторов без учёта влияния других важных факторов, а тем более их взаимодействий. Кроме того, до сих пор не разработаны методики и соответствующий математический аппарат для оценки важнейших триботехнических показателей трущихся сопряжений с ГСП, работающих как в нормальных, так и в экстремальных условиях космического пространства при произвольном сочетании давления, скорости скольжения, температуры нагрева. Поэтому расчёт интенсивности изнашивания, антифрикционных характеристик и температурного состояния ответственных узлов трения с применением ГСП в ряде случаев оказывается невозможным.

В связи с вышесказанным, диссертация по разработке методов комплексной оценки триботехнических показателей сопряжений с твердосмазочными покрытиями для различных условий эксплуатации является, безусловно, актуальной.

Целью данной работы явилась разработка методов комплексной оценки триботехнических показателей сопряжений с твердосмазочными покрытиями с учетом модификации состава покрытий, а также влияния эксплуатационных факторов применительно к различным условиям функционирования.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Для достижения поставленной цели автором решены следующие задачи:

1. В результате теоретических и экспериментальных исследований выявить наиболее существенный фактор, влияющий на триботехнические показатели пар трения с твердосмазочными покрытиями, функционирующими в условиях нормальной атмосферы и вакуума.

2. Разработать расчетный метод комплексной оценки триботехнических показателей пар трения, основанный на обобщении результатов математического эксперимента, в котором используются имеющиеся в литературе однофакторные зависимости. Получить в результате реализации метода многофакторную модель, описывающую влияние наиболее значимых технологических и эксплуатационных факторов на триботехнические показатели сопряжений с ТСП для условий нормальной атмосферы.

3. Создать методику для оценки триботехнических показателей сопряжений с ТСП и определить необходимые для их реализации зависимости применительно к ТСП различных составов и условий функционирования (условия нормальной атмосферы и вакуума) на базе найденного ранее наиболее существенного фактора.

4. Разработать методику для оценки предельных и оптимальных режимов трения смазочных материалов и получить искомые зависимости для исследуемых пар трения.

5. Исследовать комплексное влияние нагрузочно-скоростных факторов на интенсивность изнашивания, температуру и коэффициент трения пар трения с ТСП для различных условий функционирования. С этой целью разработать для условий повышенной температуры и вакуума экспериментальные установки, методику и провести исследования, в результате которых получить многофакторные модели, позволяющие с достаточной для практики точностью оценить влияние эксплуатационных факторов контактного давления и скорости скольжения на триботехнические показатели рассматриваемых фрикционных сопряжений.

6. Провести сравнительные исследования теплофрикционных характеристик ТСП и самосмазывающихся материалов для выбора оптимальных типов смазочных материалов для узлов трения, функционирующих в условиях нормальной атмосферы и вакуума.

7. Исследовать комплексное влияние технологических факторов на прирабатываемость пар трения с ТСП и явление «стоп-эффекта».

8. Исследовать влияние атмосферы соляного тумана на триботехнические показатели сопряжений с ТСП.

Научная новизна. Диссертация имеет научную новизну, основные положения диссертации, выносимые на защиту достаточно обоснованы.

- Установлены закономерности влияния нагрузочно - скоростных режимов для широкого диапазона их изменений на эксплуатационную температуру при трении, а также регрессионные зависимости интенсивности изнашивания от температуры ТСП различных составов применительно к нормальным атмосферным условиям и условиям вакуума.

- Предложен метод определения предельных и оптимальных нагрузочно - скоростных режимов трения ТСП, позволяющий получать на основании математической модели зависимости для оценки предельных и оптимальных режимов трения.

- Установлены закономерности влияния эксплуатационной температуры на коэффициент трения для нормальных атмосферных условий и условий вакуума.

- Предложен метод комплексной оценки триботехнических показателей пар трения на основании разработки математических моделей, описывающих влияние эксплуатационно - технологических факторов на триботехнические показатели сопряжений с ТСП.

Ценность для науки и практики. Диссертация имеет научную и практическую ценность содержит решение задач, имеющих существенное значение для развития одного из научных направлений машиностроения.

- Разработаны методики и получены математические модели, позволяющие на стадии конструкторской подготовки производства с достаточной для практики точностью рассчитывать для нормальных атмосферных условий, вакуума и повышенной температуры триботехнические показатели сопряжений с ТСП различных составов;

- Рекомендовано для нормальных атмосферных условий при низких контактных давлениях ($P = 11\text{--}18 \text{ МПа}$) и скоростях скольжения $V < 0,4 \text{ м/с}$ использовать самосмазывающиеся материалы (СМ) типа углеграфитового АТГ, наполненных фторопластовых антифрикционных материалов ГФ-5М, ВОЛАН-Ф, КВП-І, графитопласта АМС-5М, которые обладают меньшим коэффициентом и температурой трения, чем пара с ТСП ВНИИ НП 212, а при более напряженных 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°C;

- Создан расчетный 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 ротатабельного композиционного плана 2 порядка для 5 факторов, состоящего

из 52 опытов, для сопряжений с ТСП получена модель для расчета интенсивности изнашивания в нормальных атмосферных условиях фрикционных сопряжений с ТСП на основе MoS₂ с органическим связующим в зависимости от скорости скольжения, нагрузки, толщины ТСП, шероховатости основы и твердости контртела;

- Разработаны эффективный способ существенного снижения "стоп-эффекта" за счет использования материала контртела с более выраженным пластичными свойствами и более точный по сравнению с имеющимися способом 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.

Методы и достоверность результатов обеспечиваются большим объемом экспериментов, выполненных с привлечением современных методов исследования (стандартных и специально разработанных). Подтверждением достоверности служит наличие значительного массива данных для статистической обработки, а также совпадения результатов, полученных различными способами. В работе использованы основные положения теории трения, теории изнашивания, известные закономерности проектирования комбинированных технологических воздействий.

Работа **апробирована** на 20 научно-технических конференциях по трибологии в 1978-2018 гг. в городах: Тверь, Москва, Хемниц (Германия).

По теме диссертации **опубликовано** 63 научных работ, в том числе 24 опубликованы в журналах, включённых в список ВАК, 2 монографии, одна из которых издана зарубежным издательством, 4 авторских свидетельства, 2 из которых внедрены на предприятиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, списка использованных источников и приложений. Диссертация написана на 313 страницах машинописи, содержит 44 таблицы и 126 иллюстраций. Список использованных источников состоит из 151 наименования источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность работы, изложены ее научная новизна и практическая значимость, приведена краткая характеристика работы.

В главе 1 «Состояние вопроса» по материалам отечественной и зарубежной литературы был проведён анализ современного состояния исследований триботехнических показателей ТСП в парах трения в зависимости от различных факторов.

В главе 2 «Организация экспериментальных исследований» описана методика проведения исследований. Разработаны способ контроля времени приработки (а.с. 1059485) и стенд для изучения трения и износа в вакууме, конструкция которого признана в качестве изобретения (а. с. № 926573) для проведения исследования триботехнических показателей пар трения с ТСП, а также других смазочных материалов в условиях разряженной атмосферы.

Экспериментальное исследование воздействия атмосферы соляного тумана на триботехнические показатели имитаторов пар трения изделий аэрокосмической техники с ТСП проводилось на машине трения «роликовый прибор (РП)».

Триботехнические показатели ТСП в парах трения оценивались на установках, работающих по роликовой, торцевой схемам. Сравнительная оценка триботехнических показателей самосмазывающихся материалов (СМ) и ТСП при трении в нормальных атмосферных условиях производилась для следующих типов СМ: высокотемпературного углеродистого антифрикционного материала АТГ, наполненных фторопластовых антифрикционных материалов ГФ-5М, ВО-ЛАН-Ф, КВП-1; графитопласта АМС-5М. Применялись шлифованные контртела из закаленной стали ХВГ с твердостью HRC>60, шарикоподшипниковой стали ШХ15 и нержавеющей стали I2Х18Н9Т.

Экспериментальное исследование воздействия атмосферы соляного тумана на триботехнические показатели имитаторов пар трения изделий аэрокосмической техники с ТСП проводилось на машине трения «роликовый прибор (РП)».

В главе 3 Комплексная оценка триботехнических показателей» проведена оценка показателей композиционных ТСП. В результате измерения динамики изменения величины износа рассматриваемого покрытия, установлено, что вне зависимости от исходной толщины ТСП основная часть изношенного слоя (75-80%) приходится на период приработки и лишь 20-25% - на установившийся режим трения. Смазочная пленка толщиной в 2-3 микрометра обеспечивает в основном функционирование пары трения в течение почти всего срока службы покрытия.

Разработан расчётный метод комплексной оценки триботехнических показателей, основанный на обобщении результатов математического эксперимента, в котором использовались имеющиеся в литературе однофакторные зависимости.

Зная зависимость нагрузочно-скоростных параметров (Р и V) реальных узлов трения с ТСП, можно произвести растёт интенсивности изнашивания пар трения с композиционными ТСП со связующими веществами проходил в 3 этапа:

- 1 этап – оценка эксплуатационных характеристик работы пары трения Р и V;
- 2 этап – определение температур трения Ттр. по известным зависимостям $T_{tr.} = f(P, V)$;
- 3 этап – расчёт интенсивности изнашивания с использованием регрессионных зависимостей $I_h = f(T_{tr.})$ (в случае функционирования узла при повышенной температуре $T_{об.}$ последняя складывается с $T_{tr.}$).

Получены регрессионные зависимости на воздухе и в вакууме интенсивности изнашивания; ресурса; температуры поверхности контакта; коэффициента трения.

В главе 4 «Оценка влияния конструкторско - технологических факторов» представлены результаты влияния ряда факторов на триботехнические показатели пар трения с ТСП. В случае использования в качестве контртела кольца, изготовленного из закаленной стали ХВГ, при возобновлении

скольжения после остановов fтр. таких фрикционных сопряжений возрастает примерно в 2 раза в сравнении с его установившимся значением. Однако при трении по контртелу, изготовленному из нержавеющей стали I2Х18Н9Т, явление "стоп-эффекта" не было зафиксировано. Дальнейшие исследования показали, что при "стоп-эффекте" повышение коэффициента трения ТСП на основе MoS₂ при возобновлении скольжения вызывается не только окислением смазочной поверхности MoS₂ до абразивной трехокиси молибдена, но также и формоизменением контактной площадки на величину упругих деформаций материала контртела. В качестве одного из эффективных способов борьбы с явлением "стоп-эффекта" при работе с ТСП на основе MoS₂ было рекомендовано использование материала контртела пары трения скольжения с более выраженными пластическими свойствами.

В главе 5 «Оценка влияния эксплуатационных условий» представлены результаты влияния условий эксплуатации на триботехнические показатели пар трения с ТСП, а также сравнительной оценке указанных показателей трибосопряжений с твердосмазочными покрытиями и самосмазывающихся материалов (СМ). В результате обработки экспериментальных данных были получены математические модели, позволяющие оценить влияние нагрузочно-скоростных факторов на ресурс и коэффициент трения fтр. пар с ТСП ВНИИ НП 212 при повышенной температуре.

Проведённые проверки для схем трения «ролик-лента» (машина трения ИТК) и 4-шариковой схемы (машина трения КТ-2) подтвердили корректность моделей. Далее был разработан метод определения предельных и оптимальных нагрузочно - скоростных режимов трения смазочных материалов на примере исследования ТСП. При помощи математических методов планирования эксперимента строится матрица, в которой варьируемыми факторами являются значения контактного давления Р и скорости скольжения V, а параметром оптимизации - температура трения Tтр. После приработки пары трения с испытуемым смазочным материалом в процессе одного испытания факторы Р и V изменяют по заданному закону и непрерывно регистрируют соответствующую им Tтр. на стационарном уровне. В результате математической обработки полученных данных рассчитывается уравнение поверхности отклика типа $T_{тр.}=f(P,V)$, вводя в которое оптимальную по интенсивности изнашивания, коэффициенту трения или другому фактору, определяющему процесс трения, температуру смазочного материала, получают соответствующую зависимость вида $P_{опт.}=f(V_{опт.})$.

В главе 6 «Эффективность выполненных исследований» представлены научно обоснованные конструкторско - технологические рекомендации для практического применения результатов выполненных исследований в целях снижения интенсивности изнашивания фрикционных сопряжений с ТСП как на этапе конструкторской подготовки (расчёт ресурса, коэффициента и контактной температуры трения, оценка влияния «стоп-эффекта», подбор оптимальных технологических параметров и типов смазочных материалов и др.), так и в производстве (механизированное нанесение ТСП, оценка времени приработки и др.). Проведена оценка триботехнических показателей пар с ТСП

для реальных узлов, функционирующих в вакууме и в условиях нормальной атмосферы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В работе сформулированы 10 основных выводов, достоверность и новизна которых не вызывают сомнения.

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований выявлено определяющее влияние температурного фактора на интенсивность изнашивания и коэффициент трения рассматриваемых сопряжений как для условий нормальной атмосферы, так и для вакуума, что позволяет разработать методики оценки триботехнических показателей сопряжений с ТСП для различных условий эксплуатации.

2. Получена модель для расчёта интенсивности изнашивания в нормальных атмосферных условиях фрикционных сопряжений с ТСП на основе MoS₂ с органическим связующим в зависимости от скорости скольжения, нагрузки, толщины ТСП, шероховатости основы и твёрдости контртела 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. Полученная модель может быть использована для оценки триботехнических параметров рассматриваемых ТСП при различных сочетаниях конструкторско-технологических факторов для условий нормальной атмосферы. Использование данного метода позволяет существенно сократить объём экспериментальной работы и затраты времени.

3. Разработана методика оценки интенсивности изнашивания для пар трения с ТСП с использованием универсальных регрессионных зависимостей температуры трения от нагрузочно - скоростных параметров работы узла и регрессионных зависимостей интенсивности изнашивания от температуры трения для нормальной атмосферы и вакуума. Полученные модели применительно к парам трения с ТСП различных составов позволяют прогнозировать триботехнические показатели и ресурс узлов трения с ТСП, функционирующих в различных условиях при произвольном сочетании рассмотренных параметров.

4. Предложена методика оценки антифрикционных свойств пар трения с ТСП на основе использования регрессионных зависимостей температуры трения от контактного давления и скорости скольжения узла и регрессионных зависимостей коэффициента трения от температуры трения для нормальной атмосферы и вакуума. Определены соответствующие модели применительно к ТСП различных составов для оценки коэффициента трения трибосопряжений, функционирующих в условиях нормальной атмосферы и вакуума.

5. Впервые предложен и экспериментально опробован для пар трения с ТСП оригинальный метод определения предельных и оптимальных нагрузочно - скоростных режимов трения смазочных материалов, позволяющий получать в

результате проведения одного планируемого эксперимента зависимость для оценки оптимальных режимов трения и путём крутого восхождения по поверхности отклика зависимость для предельных режимов трения. Для трибосопряжений с ТСП ВНИИ НП-212 получены зависимости, позволяющие определять сочетания оптимальных и предельных режимов трения по скорости скольжения и контактному давлению.

6. Получены нелинейные математические модели, адекватно описывающие влияние нагрузочно-скоростных факторов на коэффициент трения и контактную температуру пар 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. Корректность всех зависимостей проверена сравнением с экспериментальными данными других исследователей, что позволяет использовать их для практических расчётов.

7. Для выбора оптимальных типов смазочных материалов для узлов трения, функционирующих в условиях нормальной атмосферы и вакуума проведена сравнительная оценка теплофрикционных характеристик пар трения с ТСП и самосмазывающихся материалов (СМ) для контртел различной твёрдости, функционирующих в указанных выше условиях. Показано, что в условиях нормальной атмосферы рассмотренные характеристики для СМ выше при $T_{тр.} < 80-100^{\circ}\text{C}$, а в вакууме лучшими показателями обладает ТСП. Неработоспособным в условиях вакуума оказался СМ высокотемпературный углеграфитовый антифрикционный материал марки АТГ.

8. Исследование комплексного влияния технологических факторов на прирабатываемость пар трения с ТСП и явление "стоп-эффекта" позволило определить оптимальные технологические параметры, обеспечивающие при минимальной интенсивности изнашивания наименьшее время приработки, разработать более точный по сравнению с имеющимися способ контрола времени приработки, а также эффективный способ существенного снижения "стоп-эффекта" за счёт использования материала контртела с более выраженным пластическими свойствами, т.е. меньшей твёрдости.

9. В результате исследования влияния атмосферы соляного тумана на триботехнические показатели пар трения с ТСП установлено, что приработанные образцы оказались практически неработоспособными после воздействия указанной атмосферы. Неприработанные образцы сохраняли удовлетворительные триботехнические свойства в течение определенного срока в зависимости от времени выдержки в камере. Лучшие триботехнические показатели в целом обнаружил ТСП ВНИИ НП-212М, сохранившее свои смазочные свойства даже после пребывания в атмосфере соляного тумана в течение 7 суток.

10. 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 1982 г.

По материалам диссертации можно сделать следующие замечания:

1. В работе приведены подробный литературный обзор твёрдосмазочных материалов, представлены интересные результаты по разработке методов комплексной оценки триботехнических показателей сопряжений с твердосмазочными покрытиями, однако:

- в разделе «Практическая значимость» на стр. 6 автореферата и на стр. 10 диссертации, автор не вполне корректно (для разных условий функционирования) даёт рекомендации о применимости смазочных материалов: «при низких контактных давлениях ($P = 11\text{--}18 \text{ МПа}$) и скоростях скольжения $V < 0,4 \text{ м/с}$ » - автор рекомендует использовать самосмазывающиеся материалы (СМ)», а «при более напряжённых режимах трения - пар с ТСП ВНИИ НП 212..». Хотелось бы, чтобы автор пояснил что такое «более напряжённые режимы трения» исходя из величин контактных давлений и скоростей скольжения.

2. На стр. 110 диссертации автор, используя сканирующий зондовый электронный микроскоп «Super Probe – 733» японской фирмы «JEOL», делает вывод, что «частицы MoS₂, хаотически закреплённые после напыления в связующем полимере (см. рисунок 3.3), после приработки ориентируются своими базисными поверхностями вдоль поверхности трения (см. рисунок 3.4). Хотелось бы услышать, какой геометрии и размера частицы MoS₂ были в исходном состоянии и как автор доказал их поворот при трении?

3. На стр. 11 автореферата и на стр. 112 диссертации, автор пишет «Таким образом, именно смазочная плёнка толщиной в 2-3 микрометра обеспечивает в основном функционирование пары трения в течение почти всего срока службы покрытия». Неясно какой был срок службы пары трения?

4. В автореферате на стр. 15, рис. 3. «Регрессионная зависимость $Ih=f(T_{tr.})$ для ТСП ВНИИ НП 212, построенная по данным автора и литературным данным». Однако, непонятно, где на графике отмечены данные автора, а где литературные?

5. В тексте автореферата и диссертации присутствуют опечатки:

- в тексте диссертации в главе 1 на стр. 15 «В атмосферных условиях на поверхности трения отсутствуют окисные плёнки, уменьшающие трение», видимо, вместо присутствуют окисные плёнки;

- в тексте диссертации на стр. 62 написано значение нагрузки $V=980 \text{ Н}$, вместо $N=980 \text{ Н}$.

- в тексте диссертации и автореферате в разделе «Научная новизна», п.1 присутствуют разнотечения. В автореферате написано: «регрессионные зависимости интенсивности изнашивания» – стр. 5, а в диссертации (стр. 10) – «термокорреляционные зависимости интенсивности изнашивания».

Заключение по диссертационной работе:

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы и не подвергают сомнению ее основные выводы, которые подтверждены результатами экспериментальных исследований.

Информация, представленная автором в диссертации, полностью отражена в автореферате. По научной и практической ценности, рассматриваемая работа соответствует пункту 9 "Положения ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней", может быть квалифицирована как законченная квалификационная работа. Она выполнена на высоком научном уровне, содержит обоснованные научно-технические решения, отличающиеся существенной новизной.

По актуальности, содержанию, значимости в научном и теоретическом плане рецензируемая диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук и соответствует специальности **05.02.04 – «Трение и износ в машинах»**, а ее автор, **Хопин Пётр Николаевич** заслуживает присуждения ему этой степени.

Официальный оппонент,
Зав. кафедрой "Машиноведение и основы конструирования" института «Металлургии, машиностроения и транспорта» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» ФГАОУ ВО «СПбПУ», руководитель лаборатории "Физико-технологических исследований и электронной микроскопии", доктор технических наук, профессор

Скотникова
Маргарита
Александровна

Адрес: 195197, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29
Телефон: +7 (921) 987-87-52
e-mail: skotnikova@mail.ru

Подпись Скотниковой М.А. удостоверяю

ВЕД СПЕЦИАЛИСТ
ПО КАДРАМ
ВАСИЛЬЕВА М.А.
09 НОЯБРЯ 2010