

На правах рукописи



МЕДИНЦЕВ Станислав Викторович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
ВИНТОВЫХ СОПРЯЖЕНИЙ С ТВЕРДОСМАЗОЧНЫМИ
ПОКРЫТИЯМИ**

Специальность: 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали
машин

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тверь – 2018

Работа выполнена на кафедре «Технология и автоматизация машиностроения» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тверской государственный технический университет»

Научный руководитель: **Бурдо Георгий Борисович**
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология и автоматизация машиностроения» ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Матлин Михаил Маркович**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Детали машин и ПТУ» ФГУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Егоров Иван Михайлович
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Машиноведение и Основы конструирования» ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Ведущая организация: Акционерное общество «Центральное конструкторское бюро транспортного машиностроения» (АО «ЦКБ ТМ»)

Защита состоится: 25 сентября в 16:00 на заседании совета Д.212.229.12 ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте <http://www.spbstu.ru>

Автореферат разослан

Учёный секретарь
диссертационного Совета



А.Н. Евграфов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В машинах и механизмах распространёнными элементами являются винтовые передачи и резьбовые сопряжения с нанесёнными на рабочие поверхности твёрдосмазочными покрытиями (ТСП). В качестве материалов для ТСП применяют мягкие металлы, графит, полимеры и композиционные материалы, содержащие дисульфиды и диселениды тугоплавких металлов. В настоящее время ряд компаний серийно выпускают винтовые передачи с ТСП. Они имеют высокую плавность хода, относительно низкий коэффициент трения и способны длительно выдерживать нагрузки в широком диапазоне температур. Как правило, при проектировании винтовых пар с ТСП используют эмпирические методы, недостатком которых является ограничение области применения условиями, в которых они получены. Поэтому разработка методов обеспечения работоспособности винтовых пар с ТСП с учетом их функционального назначения открывает новые возможности повышения качества и снижения себестоимости этих ответственных деталей машин при проектировании, что является актуальной научно-технической задачей современного машиностроения.

Объект исследования. Винтовое сопряжение с ТСП на основе мягких металлов и полимеров с антифрикционными наполнителями.

Предмет исследования. Методики оценки параметров, влияющих на работоспособность трибосопряжений типа винтовая пара с ТСП.

Цель работы заключается в разработке методик обеспечения работоспособности винтовых сопряжений с твёрдосмазочными покрытиями на этапе проектирования.

Основные задачи исследования:

1. Теоретическое исследование распределения нагрузки по виткам винтовых сопряжений с ТСП;
2. Разработка экспериментального оборудования и методики для испытаний материалов и покрытий на трение и износ;
3. Экспериментальное исследование влияния шероховатости контртела на износостойкость пар трения с ТСП;
4. Экспериментальное исследование влияния шероховатости контртела на средний размер частиц износа ТСП и их распределение в зоне контакта;
5. Экспериментальное исследование зависимости процесса приработки от шероховатости контробразца и толщины покрытия тела;
6. Разработка методик обеспечения работоспособности винтовых передач и номинально неподвижных резьбовых сопряжений с ТСП на этапе проектирования.

Научная новизна работы:

Состоит в развитии методик оценки работоспособности и управления функциональными свойствами винтовых сопряжений с ТСП:

- впервые получена теоретическая зависимость, позволяющая определять распределение нагрузки по виткам винтовых пар с ТСП при упругом и пластическом контактах;

- экспериментально подтверждена зависимость долговечности винтовой пары с ТСП от параметров шероховатости контртела (шероховатого образца);

- разработана методика обеспечения работоспособности винтовых передач и номинально неподвижных резьбовых сопряжений с ТСП на этапе проектирования.

Методология и методы исследования

Методология исследования заключалась в проведении расчетов, экспериментальных испытаний и исследования поверхностей образцов на микроуровне.

Для исследования использовались положения теории упругости и пластичности, методы экспериментальной трибологии, методы математической статистики. Для проведения испытаний пар трений с ТСП было разработано устройство для испытания материалов на трение и износ, позволяющее определять фактическую нормальную нагрузку и момент трения при торцевой схеме трения.

Для исследования образцов были использованы контактные методы, методы оптической микроскопии и растровой электронной микроскопии с возможностью проведения химического анализа.

Положения, выносимые на защиту

- методика обеспечения работоспособности винтовых передач и номинально неподвижных резьбовых сопряжений с ТСП на этапе проектирования;
- теоретические зависимости, позволяющие определять распределение нагрузки по виткам винтовых пар с ТСП при упругом и пластическом контактах в зависимости от нагрузки, свойств материалов, толщины покрытия, шага и количества витков и параметров шероховатости контртела;
- экспериментальные зависимости влияния шероховатости контртела на долговечность трибосопряжений с ТСП и распределение размера частиц износа ТСП в зоне контакта;
- зависимость процесса приработки от шероховатости контртела и толщины ТСП.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методологии оценки работоспособности и управления функциональными свойствами винтовых сопряжений с ТСП на этапе проектирования. Предложенная методика оценки распределения нагрузки по виткам винтовых пар с ТСП расширяет возможности оценки основных параметров, влияющих на работоспособность. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании резьбовых сопряжений и винтовых пар с твердосмазочными покрытиями, а также нового экспериментального оборудования для испытания пар трения с ТСП.

Обоснованность и достоверность результатов исследования.

Обоснованность и достоверность результатов исследования базируется на последовательном анализе теоретических исследований и подтверждении их данными испытаний для условий работы пар трения с твердосмазочными покрытиями. При проведении исследований использовались стандартизованные, а также, принятые в научной практике методы статистической обработки экспериментальных данных и планирования экспериментов.

Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и форумах:

1. X Всероссийская конференция по проблемам новых технологий (Миасс, 2013 г.);
2. Десятая юбилейная Всероссийская научно-техническая конференция с участием иностранных специалистов «Трибология - машиностроению» (Москва, 2014 г.);
3. Московский международный салон изобретений и инновационных технологий «Архимед» (Москва, 2015 г.)
4. Конкурс инновационных проектов «ИнноМУВ-2015-осень» (Тверь, 2015 г.)
5. Международная научно – техническая конференция «Полимерные композиты и трибология» (Республика Беларусь, Гомель 2015г.);
6. Российско-китайский форум высоких технологий (Москва, 2015 г.)

Публикации

По результатам выполненных исследований и практических разработок опубликовано 9 печатных работ (в том числе 1 патент на изобретение), из них 4 в изданиях, рекомендованных ВАК и входящих в международные системы цитирования Scopus. Список работ, в которых отражено основное содержание диссертации, приведён в конце автореферата.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, 5 глав, списка использованных источников и приложений. Диссертация написана на 116 страницах машинописного текста, содержит 9 таблиц и 51 иллюстрации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность работы, показана научная новизна, практическая ценность, цель и задачи диссертации.

В первой главе представлен анализ исследований в области винтовых пар, твердосмазочных покрытий, применяемых в винтовых сопряжениях и обзор современного оборудования для триботехнических исследований, а также анализ объекта исследований.

Впервые ТСП начали использовать в элементах космических летательных аппаратах. Новыми областями применения ТСП стали: авиационная, автомобильная промышленность, оборудование для нефтяной, химической, пищевой и фармакологической промышленности, и т.д.

Внедрение винтовых пар с ТСП является перспективным на предприятиях химической отрасли. Одним из таких предприятий является ООО «Альстром Тверь», в производственном цикле которого, в узле формирования стеклохолста используется винтовое сопряжение АТ052.000.00.000 СБ с жидкой смазкой. Основным недостатком данного винтового сопряжения является использование жидкой смазки, т.к. она в процессе производства при попадании на продукции, приводит к возникновению бракованных готовых изделий.

Также к недостаткам данного винтового сопряжения можно отнести:

1. При работе винтового сопряжения в условиях щелочных сред, жидкая смазка теряет свои антифрикционные свойства;
2. Повышенный износ в режиме старт-стоп;

3. Высокая нагрузка на первый виток приводит к снижению несущей способности винтового сопряжения и повышенному износу.

Данные недостатки снижают надежность винтовой пары и повышают вероятность отказа.

В изучение функциональных свойств трибосопряжений с ТСП внесли вклад отечественные ученые – Демкин Н.Б., Егоров, И.М., Крагельский И.В., Матлин М.М., Михин Н.М., Сентюрихина Л.Н., и др., а также иностранные исследователи – Р. Бартон, Ф. Боуден, С. Мюллер, Е. Рабинович, Е. Робертс, К. Холберг, и др.

В работах Мюллера исследована зависимость срока службы покрытия на основе MoS_2 от его первоначальной толщины. Установлено, что чем толще покрытие, тем больше его ресурс.

В работах Робертса показано, что для покрытий на основе MoS_2 их долговечность возрастает с увеличением шероховатости поверхности контробразца.

В изучение распределения нагрузки по виткам трибосопряжений типа винтовая пара внесли свой вклад исследователи – Жуковский Н.Е., Биргер И.А., Куклин В.Б., Иванов А.С., Егоров И.М. и другие.

В работах А.С. Иванова были сделаны следующие выводы: увеличение шероховатости рабочей поверхности резьбы благоприятно сказывается на распределении нагрузки по ее виткам; применение мелкой резьбы при стандартной высоте гайки способно существенно повысить равномерность распределения нагрузки по виткам резьбы, практически не снижая прочности резьбы на срез и смятие; увеличение силы затяжки винта снижает долю внешней нагрузки, приходящуюся на первый виток резьбы гайки.

В работах И.М. Егорова проведена оценка влияния действительного направления нормали и значения давления в различных точках боковой поверхности витка на точность результатов расчета момента и КПД в винтовой паре. В результате исследований была разработана программа расчета винтового механизма при возможных законах распределения давления на рабочей поверхности витка, которая позволяет получать уточненные данные по несущей способности винтового механизма и КПД.

Работы данных ученых не охватывают область исследования винтовых пар с ТСП. Поэтому задача обеспечения работоспособности винтовых сопряжений с ТСП, используемых в машинах, является актуальной и имеет важное научное и практическое значение.

Во второй главе рассматриваются методы и средства экспериментального исследования работы.

Для испытаний в качестве ТСП использовалось композиционное покрытие ВНИИНП- 212 на основе мочевиноформальдегидной смолы с наполнителем MoS_2 , нанесенное на образцы из стали 45. Фактические значения средних исходных толщин покрытий, определяемых с помощью многофункционального прибора Константа К5, изменялось от 16 до 34 мкм. Контробразцы изготовлялись из стали 45 и имели изотропную шероховатость, получаемую доводкой их поверхностей с помощью корундовых порошков и алмазных паст. Средние значения исходных параметров микрогеометрии контробразцов, определённых с помощью профилографа TR200, представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Исходные параметры микрогеометрии контрообразцов

№ образца	Ra (мкм)	Rq (мкм)	Rp (мкм)	Sm (мм)	tm
1	0,08	0,11	0,29	0,03	0,69
2	0,26	0,34	0,77	0,04	0,48
3	1,76	2,22	4,97	0,08	0,59
4	3,4	4,3	9,9	0,21	0,36

Для проведения испытаний разработано и создано устройство для испытаний материалов на трение и износ (УМТИ) (рисунок 1) с возможностью вывода данных на ПК. В основе конструкции устройства лежит техническое решение, защищенное патентом на изобретение №2531124 от 20.10.2014. Характеристики УМТИ: диапазон частот вращения образца 220-1500 об/мин, отклонение от точности измерения параметров $\pm 0,2\%$.



Рисунок 1 – УМТИ.

Здесь в патроне станка 1 закреплён адаптер 2, приводящий во вращение верхний образец 3, а силоизмерительная система УМТИ 4, установлена на столе 5 нагружающего устройства 6. Применение нагружающего устройства не обязательно, т.к. в УМТИ ведётся непрерывное измерение нормальной нагрузки и она может создаваться через приводы подачи станка. Элементы электронного измерительного блока представлены датчиками 7, электронно-цифровыми измерительными приборами “Микрон” 8, АЦП 9, ПК 10 и прибором для управления прерываниями испытаний объединённым со счётчиком полных оборотов адаптера 11.

Для исследования микроструктуры поверхностей образцов использовался металлографический микроскоп Альтами МЕТ 1М, для исследования микроструктуры поверхностей и количественного анализа химического состава образцов использовался растровый электронный микроскоп JEOL JSM-6610LV с аналитической приставкой Oxford INCA Energy 350 X-Max 20.

В третьей главе рассмотрены результаты исследований распределения нагрузки по виткам трибосопряжений типа винтовая пара с твердосмазочными покрытиями.

При взаимодействии шероховатой поверхности витка гайки с поверхностью витка винта, на которую нанесено ТСП, возникающие контактные деформации существенно больше объёмных деформаций витков. Поэтому в уравнениях совместности перемещений деформации витков заменим, на соответствующие контактные деформации шероховатой поверхности с поверхностью, на которую нанесено ТСП.

Для рассматриваемой задачи условие равновесия и уравнения совместности перемещений Ивановым А.С. была получена следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} F &= F_1 + \dots + F_i + \dots + F_n \\ a_1 - a_2 &= \Delta_{11} + \Delta_{21} \\ a_i - a_{i+1} &= \Delta_{1i} + \Delta_{2i} \\ a_{n-1} - a_n &= \Delta_{1(n-1)} + \Delta_{2(n-1)} \end{aligned} \quad (1)$$

где F – осевая нагрузка воспринимаемая резьбовым сопряжением; F_i – осевая нагрузка воспринимаемая i -м витком резьбового сопряжения; n – число витков гайки; a_i – контактная деформация шероховатой поверхностью i -го витка гайки ТСП нанесённого на поверхность винта; $\Delta_{1i} = P \sum_{i+1}^n F_i / E_B A_B$ – удлинение тела винта между i -м и $i+1$ витками; $\Delta_{2i} = P \sum_{i+1}^n F_i / E_G A_G$ – укорочение тела гайки между i -м и $i+1$ витками; P – шаг резьбы; E_B, E_G – модули упругости материалов винта и гайки; A_B, A_G – минимальные площади поперечного сечения винта и гайки.

Для решения системы уравнений (1) необходимо знать контактные деформации a_i , возникающие при внедрении шероховатой поверхности в поверхность имеющую ТСП.

Предложены аналитические соотношения для расчёта контактных деформаций шероховатых поверхностей с ТСП при их упругой и пластической деформации. Для случая упругой деформации ТСП нанесённого на поверхность винта шероховатой поверхностью i -го витка гайки можно записать:

$$a_i = a_{i*} \left(\frac{\lambda^{4/3} + \frac{\delta}{2\sqrt{ra_{i*}}}}{\sqrt{1 + \frac{\delta^2}{4ra_{i*}}}} \right)^{3/2(2\nu+1)} \quad (2)$$

$$\text{где } a_{i*} = R_p \left[\left(\frac{3\pi}{2t_m K_3} \right) \sqrt{\frac{r}{R_p}} J_{\Pi} \frac{F_i}{A_i} \right]^{2/2\nu+1}; \quad \lambda = \frac{J_{\Pi}}{J_B}; \quad J_{\Pi} = \frac{1-\mu_{\Pi}^2}{E_{\Pi}}; \quad J_B = \frac{1-\mu_B^2}{E_B};$$

δ – толщина ТСП; r – средний радиус вершин микронеровностей поверхности гайки; R_p – высота наибольшего выступа профиля шероховатой поверхности гайки; A_i – проекция номинальной площади контакта витка резьбы на плоскость перпендикулярную оси резьбового сопряжения; t_m – относительная опорная длина профиля по средней линии, ν – параметр аппроксимации опорной кривой; $K_3 = \frac{\Gamma(2,5)\Gamma(\nu+1)}{\Gamma(\nu+1,5)}$; $\Gamma(x)$ – гамма функция x ; μ_{Π} ,

μ_B – коэффициенты Пуассона материалов ТСП и винта; $E_{п}, E_B$ – модули упругости материалов ТСП и винта; $J_{п}, J_B$ – упругие постоянные ТСП и винта.

Для пластической деформации ТСП контактную деформацию можно представить в виде:

$$a_i = a_{i*} \left(\frac{3,266 \delta}{\sqrt{ra_{i*} + 3,266 \delta}} \right)^{4/5\nu+1} \quad (3)$$

где $a_{i*} = R_p \left(\frac{F_i}{A_i HV_{t_m}} \right)^{1/\nu}$; HV – микротвёрдость ТСП по Виккерсу.

Таким образом, получены две нелинейные системы уравнений для случая упругого и пластического деформирования ТСП в резьбовом сопряжении, описываемые соотношениями (1), (2) и (1), (3) соответственно. Системы уравнений решались с помощью специализированного программного обеспечения. При расчётах использовались геометрические размеры, материалы и номинальная нагрузка реальной винтовой передачи с ТСП на основе политетрафторэтилена марки ФБФ-74Д и серебра.

Расчёты, проведённые при упругом деформировании ТСП из серебра, для винтового сопряжения, имеющего 20, 15, 10 и 5 витков показывают, что расчёты по винтовому сопряжению с 5 витками приводят к завышению максимальной нагрузки на виток более чем на 60%.

На рисунке 2 для винтового сопряжения с серебряным покрытием, имеющего 20 витков, представлено сравнение распределения нагрузок по виткам резьбового сопряжения при упругих и пластических деформациях ТСП шероховатой поверхностью витка гайки. Результаты сравнительных расчётов показывают, что при упругих деформациях покрытия нагрузка между витками распределяется более равномерно, поэтому в случае пластического характера деформаций ТСП условия эксплуатации резьбового сопряжения являются более жёсткими. Для серебряного покрытия при пластическом контакте первые два витка воспринимают 44,5% (соответственно 26,1% и 18,4%) от общей нагрузки. С учетом этого коэффициент неравномерности нагрузки по виткам составляет $K_m = 0,70$. При упругой деформации первый и второй витки резьбы воспринимают 24,6% (соответственно 13,4% и 11,2%), а $K_m = 0,84$.

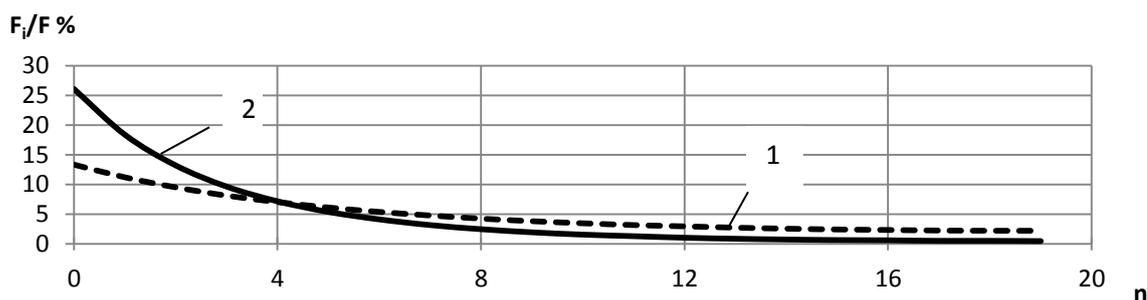


Рисунок 2 – Распределение относительной нагрузки F_i / F по виткам n резьбового сопряжения при упругой (1) и пластической (2) деформации.

Для тех же условий было исследовано влияние механических свойств материала покрытия на распределения нагрузок по виткам резьбового сопряжения в случае пластического деформирования ТСП (рисунок 3). Покрытие ФБФ-74Д являясь более мягким, чем серебряное, обеспечивает меньшую жёсткость стыка в витках резьбового сопряжения и более равномерное распределение нагрузки между ними. Для ФБФ-74Д первый и

второй витки резьбы воспринимают 15,6% (соответственно 8,1% и 7,5%) от общей нагрузки. С учетом этого коэффициент неравномерности нагрузки по виткам составляет $K_m = 0,93$.

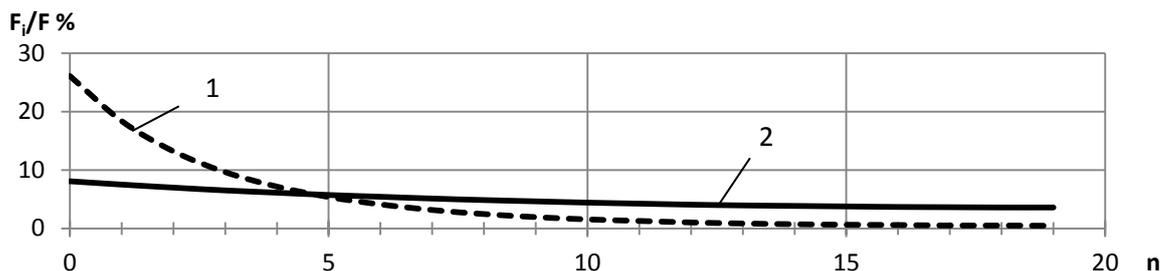


Рисунок 3 – Распределение относительной нагрузки F_i / F по виткам n резьбового сопряжения с серебряным ТСП (1) и с ФБФ-74Д (2) при пластическом контакте.

Аналогичный эффект выравнивания распределения нагрузки между витками происходит при ухудшении качества поверхности витка гайки, которое также приводит к уменьшению жёсткости стыка шероховатой поверхности витка гайки и ТСП, нанесённого на поверхность витка винта. В данном случае расчёты проводились для ТСП из серебра также в условиях его пластического деформирования для случаев обработки гайки полусточным и тонким точением.

Влияние толщины покрытия ФБФ-74Д в пределах от 5 мкм до 20 мкм не показало её существенное влияние на распределения нагрузки между витками при пластическом и упругом деформировании ТСП. Также расчёты показали незначительное влияние абсолютного значения номинальной нагрузки на её распределение между витками в винтовой передаче.

Полученные расчетные соотношения, позволяют прогнозировать распределение нагрузки по виткам трибосопряжения типа винтовая пара с ТСП в зависимости от физических свойств покрытия, шероховатости гайки, шага резьбы, нагрузки, толщины покрытия при упругом и пластическом контакте. В свою очередь это позволяет управлять функциональными свойствами винтовых пар с ТСП и оценивать их работоспособность.

В решении Н.Е. Жуковского о распределении нагрузки между витками резьбы без использования ТСП показано, что первый и второй витки резьбы воспринимают 57% (соответственно 34% и 23%) от общей нагрузки. С учетом этого коэффициент неравномерности нагрузки K_m по виткам крепежной метрической резьбы с учетом пластических деформаций принимает значения от 0,55 до 0,75.

Часто расчеты резьбы выполняют в форме расчетов по средним номинальным напряжениям, полагая $K_m = 1$. Это связано с приближенным геометрическим подобием резьб разных размеров и с тем, что допускаемые напряжения выбирают на основе испытаний резьбовых соединений или данных эксплуатации. Поэтому в методиках проектирования винтовых сопряжений, основанных на теоретических исследованиях принимать $K_m = 1$ нельзя. Полученные в работе соотношения показывают, что при использовании ТСП в винтовых сопряжениях коэффициент K_m принимает значения от 0,70 до 0,93.

В четвертой главе рассмотрены результаты экспериментальных исследований трибосопряжений с ТСП.

Экспериментальное исследование долговечности ТСП, на примере ВНИИ НП-212, в зависимости от исходной шероховатости контрообразца, проводилось на разработанной УМТИ при торцевой схеме трения. Режимы испытания образцов: скорость трения 0,173 м/с, площадь взаимного перекрытия образцов 0,00024 м², номинальное давление 0,15 МПа. Образцы считались изношенными при повышении коэффициента трения на 30% от первоначального. Представленные на рисунке 4 результаты позволяют сделать вывод о наличии рациональной шероховатости Ra=1,76 для контрообразцов, взаимодействующих с образцом с ТСП.

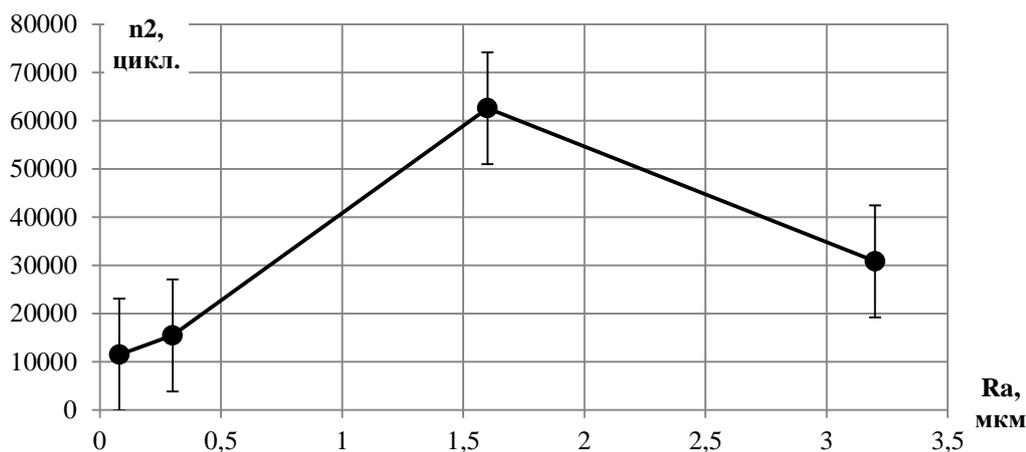


Рисунок 4 – Влияние исходной шероховатости контрообразцов на долговечность покрытия ВНИИ НП-212.

Результаты исследования эволюции микрогеометрии контрообразцов при фрикционном взаимодействии ТСП с поверхностями, имеющими различную исходную шероховатость, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Эволюция микрогеометрии контрообразцов

№ образца	Ra (мкм)	Rq (мкм)	Rp (мкм)	Sm (мм)	tm
1-после приработки	0,035	0,05	0,17	0,037	0,47
1-после истощения ресурса	0,05	0,07	0,2	0,041	0,65
3-после приработки	1,06	1,37	3,4	0,1	0,61
3-после истощения ресурса	1,15	1,4	2,96	0,182	0,59

Видно, что высотные параметры микрогеометрии контрообразцов, достигают минимума по окончании приработки и возрастают после истощения ресурса ТСП, не достигая своих исходных значений.

Анализ поверхности образца с ВНИИ НП-212 и взаимодействующего с ним контрообразца 3 показал, что основная часть материала ТСП, после приработки, за счёт фрикционного переноса с поверхности образца формирует покрытие на шероховатой поверхности контрообразца. Потеря работоспособности пары трения происходит при полном локальном износе

покрытия на поверхностях образца и контрообразца. При анализе образца с ТСП и взаимодействующего с ним контрообразца 1, имеющего меньшую шероховатость, существенного фрикционного переноса материала ТСП на их поверхность после приработки не обнаружено.

Результаты сравнительного анализа химического состава (таблица 3) разномасштабных зон 1-го и 3-го контрообразцов после исчерпания ресурса ТСП показывают низкое содержание элементов Mo и S, образующих MoS₂, на поверхности контрообразца 1. Однако на его поверхности присутствуют частицы износа ВНИИ НП-212.

Таблица 3 – Содержание химических элементов на поверхности контробр.

№ спектра	№ контрообр.	Содержание хим. элемента, %						
		C	N	O	Si	S	Fe	Mo
1	1	55,60	9,04	8,52	-	11,65	8,50	6,69
	3	51,08	9,25	12,49	-	14,25	4,52	8,40
2	1	74,42	3,28	4,58	0,12	0,86	16,20	0,55
	3	68,38	7,49	4,97	0,10	12,20	0,08	6,94
3	1	41,26	-	6,55	-	1,25	50,13	0,82
	3	44,12	11,79	11,19	-	20,55	0,17	12,53
4	1	42,08	-	6,33	-	1,58	48,94	1,08
	3	43,63	12,00	11,65	-	19,27	2,01	11,43

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что при возрастании шероховатости, ТСП аккумулируется во впадинах контрообразца, что позволяет задерживаться покрытию в зоне контакта, тем самым повышать долговечность пары трения. В тоже время, при увеличении исходной шероховатости более Ra 1,6 мкм, ТСП толщиной 20 мкм не достаточно, чтобы заполнить впадины на поверхности контрообразца, что объясняется снижением долговечности.

Результаты исследований влияния шероховатости на размер частиц износа покрытия ВНИИ НП-212 при различных шероховатостях контрообразцов показывают, что наиболее равномерное распределение размера частиц износа ТСП происходит при шероховатости равной соответствующей 3-му контрообразцу (Таблица 1).

Исследования размеров частиц износа ТСП для пар трения с контрообразцами, имеющими различную исходную шероховатость, показывают, что для реализованных режимов и условий испытаний распределение средних размеров частиц износа в зависимости от шероховатости имеет минимум соответствующий 3-му контрообразцу (Таблица 1).

Результаты экспериментальных исследований влияния исходных толщин покрытий δ , наносимых на образцы, на число циклов n_l до окончания их приработки для исследуемых контрообразцов показывают, что увеличение толщины ТСП приводит к увеличению продолжительности приработки пар трения. При этом с увеличением высотных параметров микрогеометрии контрообразцов (R_a , R_p) продолжительности приработки также увеличивается.

Проведенный комплекс исследований показал, что наиболее рациональной из исследованных является шероховатость соответствующая контробразцу 3.

Пятая глава посвящена управлению параметрами и разработке методики обеспечения работоспособности винтовых передач с ТСП и номинально неподвижных резьбовых сопряжений с ТСП.

Основным параметром, определяющим работоспособность резьбовых передач с ТСП, является максимальная несущая способность. При расчетах максимальной несущей способности, необходимо опираться на расчеты контактных давлений, возникающих на витках.

Уравнение осевой нагрузки F_i , воспринимаемой i -м витком винтового сопряжения, можно выразить в виде:

$$F_i = q_k A_i \cos \frac{\alpha}{2} \quad (5)$$

где α – угол профиля; q_k – средние контактные давления; A_i – номинальная площадь контакта i -го витка.

Учитывая, что максимальное давление сосредоточено на первом витке, при проектировании винтовых передач с ТСП необходимо производить расчет допускаемых нагрузок на данный виток:

$$[F_1] = \frac{\pi d_2 h t_m K_3 K_m}{4,712 J_1} \sqrt{\frac{R_p}{r}} \left(\varepsilon_{kp} + \frac{0,2 \varepsilon_{kp}^{1,5}}{\frac{\nu \delta}{2\sqrt{r R_p}} - 0,05} \right)^{\frac{2\nu+1}{2}} \quad (6)$$

где h – номинальная высота профиля винтового сопряжения, d_2 – средний диаметр резьбы, ε_{kp} – критическое внедрение произвольного выступа шероховатой поверхности в ТСП; δ – толщина ТСП; r – средний радиус вершин микронеровностей поверхности гайки; R_p – высота наибольшего выступа профиля шероховатой поверхности гайки; t_m – относительная опорная длина профиля по средней линии, ν – параметр аппроксимации опорной кривой; $K_3 = \frac{\Gamma(2,5)\Gamma(\nu+1)}{\Gamma(\nu+1,5)}$; $\Gamma(x)$ – гамма функция x ; J_1 – упругая постоянная ТСП; K_m – коэффициент неравномерности нагрузки по виткам составляет.

Решая систему уравнений (1), (3), (4), (5) и (6) можно произвести расчет максимальной несущей способности винтовых пар с ТСП. При этом, учитывая соотношения и зависимости по влиянию используемых материалов, шероховатости изготовления гайки, шага резьбы, толщины покрытия и других параметров на распределение нагрузки по виткам, можно снижать нагрузку на первый виток, тем самым управлять параметрами винтовых пар с ТСП.

Методика обеспечения работоспособности винтовых пар с ТСП представлена на рисунке 5.

Основными параметрами, определяющими работоспособность номинально неподвижных резьбовых сопряжений, является усилие затяжки. Данный параметр предотвращает разгерметизацию резьбового соединения. Для улучшения характеристик необходимо обеспечить максимально возможное усилие затяжки. Также стандартные резьбы выполняют близкими

к условию равной прочности на четыре возможных вида разрушения: разрыв стержня болта по внутреннему диаметру, на срез, смятие или изгиб резьбы.

Для определения данных параметров номинально неподвижного резьбового сопряжения с ТСП необходимо решить систему уравнения и определить силы F_i , создаваемые силой $F = F_{зат} + \chi F_a$ при воздействии отрывающей силы F_a . При этом необходимо производить расчет при пластическом деформировании ТСП (3).

$$F_{зат} + \chi F_a = F_1 + \dots + F_i + \dots + F_n$$

$$a_1 - a_2 = \Delta_{11} + \Delta_{21}$$

$$a_i - a_{i+1} = \Delta_{1i} + \Delta_{2i}$$

$$a_{n-1} - a_n = \Delta_{1(n-1)} + \Delta_{2(n-1)} \quad (7)$$

$$\frac{l_d(1 - \chi)F_a}{E_d A_d} + c_d \varepsilon_d \left[\left(\frac{F_{зат} + (1 - \chi)F_a}{A_d} \right)^{0.5} - \left(\frac{F_{зат}}{A_d} \right)^{0.5} \right] = \frac{4\chi F_a}{\pi E} \left(\frac{l_0 + 0.5H_2}{d^2} + \frac{l_1}{d_1^2} \right) + R_p \left(\frac{F_{1\Sigma}}{A_i HV t_m} \right)^{1/v} \left[\frac{3,266\delta}{\sqrt{rR_p \left(\frac{F_{1\Sigma}}{A_i HV t_m} \right)^{1/v} + 3,266\delta}} \right]^{4/5v+1} - R_p \left(\frac{F_1}{A_i HV t_m} \right)^{1/v} \left[\frac{3,266\delta}{\sqrt{rR_p \left(\frac{F_1}{A_i HV t_m} \right)^{1/v} + 3,266\delta}} \right]^{4/5v+1}$$

где χF_a – нагрузка на винт, создаваемая силой F_a ; l_d – высота деталей; E_d – модуль упругости материала деталей; A_d – площадь поверхности контакта деталей; ε_d – коэффициент влияния масштаба контактирующих поверхностей деталей; c_d – коэффициент влияния шероховатости контактирующих поверхностей деталей; d – диаметр винта; d_1 – внутренний диаметр резьбы винта; l_0 – длина гладкой части винта; H_1 , H_2 – высота гайки и головки винта; l_1 – длина нарезанной нагруженной части винта.

Учитывая соотношения и зависимости по влиянию используемых материалов, шероховатости изготовления гайки, шага резьбы, толщины покрытия и других параметров на распределение нагрузки по виткам, можно управлять параметрами номинально неподвижных резьбовых сопряжений с ТСП. Методика обеспечения работоспособности аналогична с методикой для винтовых пар с ТСП.

По результатам проведенных исследований была разработана методика ТСП ЦИ029, по которой изготовлена и внедрена на узле формирования стеклохолста ООО «Альстром Тверь» винтовая пара с покрытием ВНИИ НП-212 № ЦИ029.000.000 СБ. В результате внедрения данного винтового сопряжения удалось достичь снижения брака готовой продукции.

Также к положительным эффектам внедрения винтового сопряжения с ТСП можно отнести: пониженный износ в режиме старт-стоп, снижение нагрузки на первый виток в результате использования ТСП, которое приводит к повышению максимальной несущей способности и износостойкости винтового сопряжения.

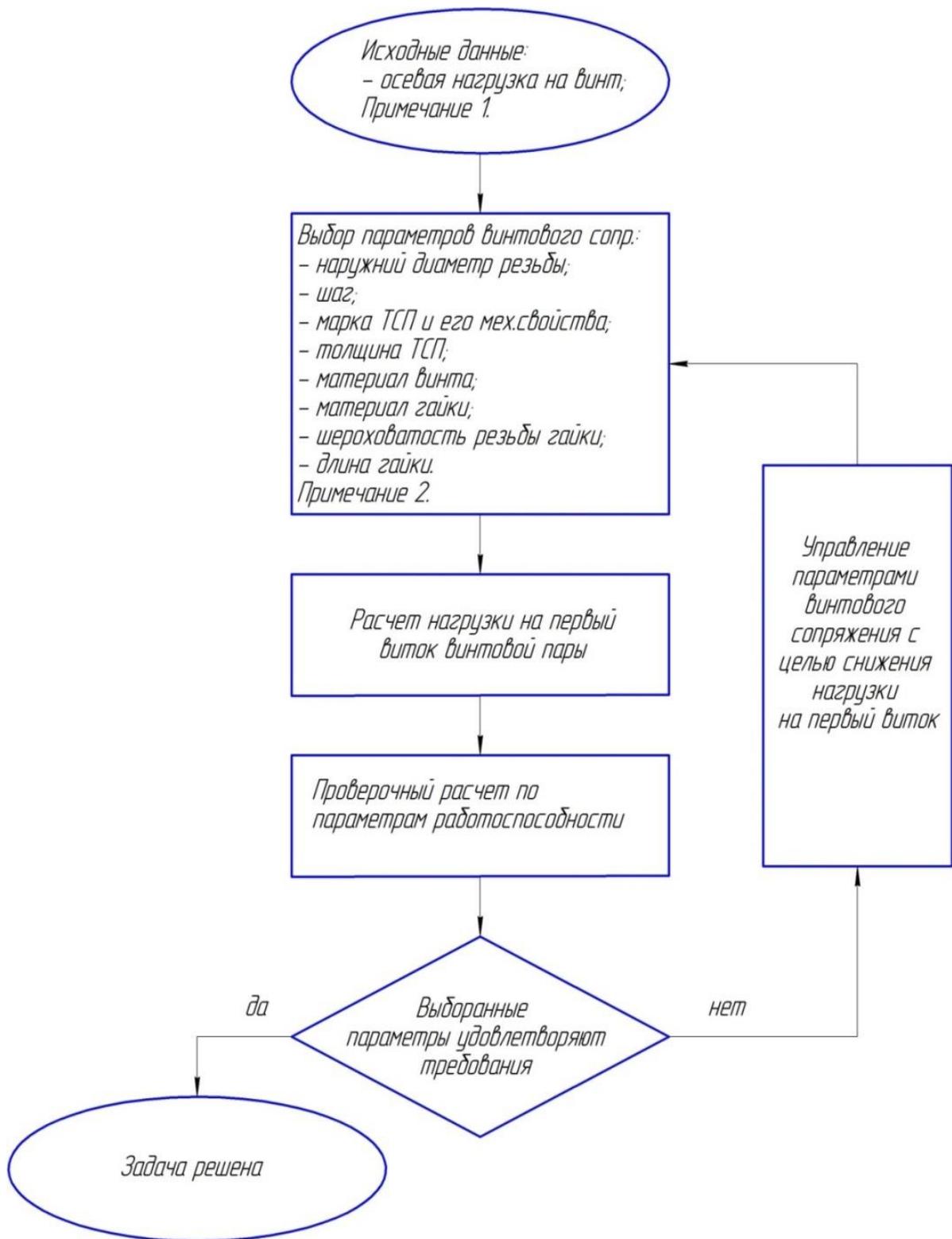


Рисунок 5 – Методика обеспечения работоспособности винтовых пар с ТСП

Примечание 1. Кроме осевой нагрузки, к винтовым сопряжениям могут предъявляться и другие требования (например, шаг резьбы, наружный диаметр резьбы).

Примечание 2. Если в блоке «Исходные данные» к винтовому сопряжению с ТСП предъявлялись дополнительные параметры, то данных параметров не будет в данном блоке.

ВЫВОДЫ

Получены теоретические и экспериментальные зависимости, которые позволили разработать методику обеспечения работоспособности винтовых сопряжений с ТСП. При проведении теоретических и экспериментальных исследований получены следующие результаты:

1. Разработана методика обеспечения и повышения работоспособности винтовых передач с ТСП и номинально неподвижных резьбовых сопряжений с ТСП;

2. Получены расчетные соотношения, позволяющие прогнозировать распределение нагрузки по виткам трибосопряжения типа винтовая пара с ТСП, а также соответствующие значения коэффициента неравномерности распределения нагрузки K_m , в зависимости от физических свойств покрытия, шероховатости гайки, шага резьбы, нагрузки, толщины покрытия при упругом и пластическом контакте. Теоретические исследования показывают, что при использовании ТСП K_m принимает значения от 0,70 до 0,93.

3. Разработана методика и оборудование для экспериментального исследования фрикционного взаимодействия пар трений с ТСП в широких нагрузочно-скоростных диапазонах режимов испытаний;

4. Получена экспериментальная зависимость влияния шероховатости контртела на износостойкость пар трения с ТСП. Исследована наиболее рациональная шероховатость контртела. Установлено, что основная часть материала ТСП, после приработки, за счёт фрикционного переноса с поверхности образца формирует покрытие на шероховатой поверхности контробразца.

5. Получена экспериментальная зависимость влияния шероховатости контртела на средний размер частиц и распределение размера частиц износа ТСП в зоне контакта. Установлено, что в общем случае, распределение размера частиц можно описать экспоненциальным распределением. Установлено, что для реализованных режимов и условий испытаний распределение средних размеров частиц износа в зависимости от шероховатости имеет минимум соответствующий контробразцу исходной шероховатостью Ra 1,76 мкм.

6. Получена зависимость процесса приработки от шероховатости контробразца и толщины покрытия тела.

Разработанная методика позволяет обеспечивать надежность винтовых сопряжений с ТСП. Результаты работы внедрены в учебные курсы ТвГТУ «Трибология», «Триботехника», «Физические эффекты в машиностроении». Результаты работы внедрены в ООО «Альстром Тверь» для проведения проектных расчётов ходовых винтов с ТСП узла формирования стеклохолста.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

Сутягин О.В., Мешков В.В., Мединцев С.В./ Влияние твердосмазочных покрытий и шероховатости контактирующих поверхностей на распределение нагрузки по виткам резьбовых сопряжений и винтовых передач/ Научно-технический и производственный журнал «Вестник машиностроения», Номер 7 - Москва, 2015 – с. 46 – 50.

O. V. Sutyagin, V. V. Meshkov, and S. V. Medintsev/ Influence of Solid-Lubricant Coatings and Contac-Surface Roughness on the Load Distribution over the Turns of Threaded Joints and Screw Transmissions// Russian Engineering Research, 2015, Vol. 35, No. 10, pp. 745–749.

Сутягин О.В., Мешков В.В., Мединцев С.В./ Универсальное устройство для триботехнических испытаний материалов и покрытий// Научно-технический журнал «Заводская лаборатория. Диагностика материалов», Москва – 2016 – Том 82, №10 – с.62 - 66.

Бурдо Г.Б., Мединцев С.М., Мешков В.В./ Распределение нагрузки по виткам резьбовых сопряжений при использовании твердосмазочных покрытий// Международный научно-исследовательский журнал «Успехи современной науки, №11, Том 4 – Белгород, 2016 – с. 70 – 73 (на момент публикации входил в перечень ВАК).

Другие статьи:

О.В. Сутягин, В.В. Мешков, С.В. Мединцев/ К оценке износа винтовых сопряжений с твердосмазочными покрытиями// Тезисы докладов международной научно-технической конференции — Гомель: ИММС НАН Б, 2015. – с. 108

2. О.В. Сутягин, А.Н. Болотов, В.В. Мешков, С.В. Мединцев, А.А. Рачишкин/К оценке триботехнических свойств твердосмазочных покрытий// Новые технологии. Том 1. - Труды X Всероссийской конференции по проблемам новых технологий.- М.: РАН,2013, с.52 - 62

3. О.В. Сутягин, В.В. Мешков, С.В. Мединцев/Распределение нагрузки в витках винтовых сопряжений с твердосмазочными покрытиями// Трибология-машиностроению: Труды десятой юбилейной Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов – М: Издательство «Перо», 2014 – с. 127.

4. В.В. Мешков, О.В. Сутягин, С.В. Мединцев, С.П. Рыков/ Влияние твердосмазочных покрытий на распределение нагрузки по виткам резьбовых сопряжений при пластическом контакте// Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования, Межвузовский сборник научных трудов, Выпуск 8 - Тверь, 2015 – с. 31-34.

Изобретения:

Пат. 2531124 Российская Федерация, МПК G01N 3/56. Устройство для испытания материалов на трение и износ [Текст] / Мешков В.В., Сутягин О.В., Мединцев С.В.; заявитель и патентообладатель Тверской государственный технический университет - № 2013129644/28; заявл. 27.06.2013; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 29 – 7 с.

Подписано в печать 22.05.2018. Формат 60 x 90/16
Бумага офсетная. Печать офсетная
Печ. л. 1. Тираж 100 экз.
Зак. № 202

Отпечатано в ООО «Научные технологии»
170023, г. Тверь, ул. Маршала Конева, д. 12