

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Особенностью развития современного машиностроения является использование различных технологических методов, обеспечивающих надежную работу узлов трения, в том числе резинометаллических, эксплуатирующихся, как правило, в сложных условиях. Применяемые технологические методы повышения ресурса резиботехнических изделий (РТИ), использующихся в таких сопряжениях, могут быть разделены на две группы. Первая группа методов предусматривает изменение триботехнических характеристик РТИ путем введения в состав резины различных функциональных добавок, вторая - заключается в целенаправленном изменении структуры и свойств поверхностных слоев в результате различного по своей природе энергетического воздействия, приводящего, как правило, к формированию композиционных покрытий (электрохимические методы, фторирование, эпиламирование и др.).

Методы второй группы, практически не влияя на объемные показатели резины, позволяют достаточно эффективно изменять поверхностные, в том числе, и триботехнические свойства резины, что определяет их значительную эффективность и возможность достижения комплекса высоких эксплуатационных свойств. К числу наиболее перспективных методов этой группы следует отнести плазмохимические технологии, позволяющие формировать на поверхности РТИ тонкие полимерные покрытия, контролируя при этом порядок нанесения слоев и их состав. Данные покрытия практически не оказывают влияния на геометрические размеры узлов трения и позволяют существенно повысить служебные параметры резины. Однако процессы протекающие при трении, физико-механические свойства поверхностно-модифицированных РТИ изучены недостаточно. Отсутствует также информация об оптимальных условиях и режимах эксплуатации модифицированных в газовой фазе РТИ, что затрудняет их использование на практике.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Диссертационная работа выполнена в соответствии с заданиями республиканской научно-технической программы "Триботехника" (задание 5.10), а также при проведении НИОКР по планам министерства образования РБ (гос. рег. № 1997172, гос. рег. № 19981678), договора № 1949 (гос. рег. № 19972314), выполненного по заказу Белорусской железной дороги, задания 01.03.02 межвузовской программой "Химия композиционных материалов" (гос. рег. № 20011510) и ряда других научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий.

Цель и задачи исследования. Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния условий и режимов контактного взаимодействия на триботехнические свойства и механизм изнашивания резины, поверхностно модифицированных в активной газовой фазе, разработке на основе

полученных результатов рекомендаций по их эффективному практическому использованию в подвижных резинометаллических устройствах.

Задачи исследования:

- усовершенствовать методику непрерывного контроля изменений линейных размеров резинометаллических трибосопряжений в процессе трения, учитывающую особенности изучаемого объекта;

- изучить кинетику и закономерности физико-химических процессов трения и изнашивания поверхностно-модифицированных резины, эксплуатирующихся при различных условиях;

- определить зависимость триботехнических характеристик модифицированных РТИ от нагрузки, скорости скольжения, шероховатости контактирующих элементов и вида покрытия;

- установить оптимальные режимы эксплуатации модифицированных РТИ и разработать рекомендации по их применению.

Объект и методология проведенного исследования. Исследовались исходные резиботехнические изделия преимущественно на основе бутадиеннитрильного каучука, модифицированные с комбинированными покрытиями из галитетрафторэтилена (ПТФЭ) и полиуретана (ПУ), нанесенными из активной газовой фазы.

В качестве параметров, характеризующих исходные и модифицированные поверхности, использовали: поверхностную энергию, ее дисперсную и полярную составляющие, определяемые методом Фоукса; коэффициент трения и величину износа, которые фиксировались на машине трения 2070 СМТ-1; температуру, измеряемую при помощи термопар, установленных в приповерхностных слоях контактирующих элементов.

Морфологические особенности модифицированных поверхностей резины изучались методами оптической и атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Обработка экспериментальных результатов осуществлялась методами математической статистики.

Научная новизна полученных результатов. Определены закономерности кинетики триботехнических характеристик пар трения и влияние на них поверхностного модифицирования резины, условий и режимов трения. С помощью усовершенствованной методики "in situ" контроля размеров трибосопряжений с учетом их теплового расширения, интенсивности изнашивания показано, что циклические изменения момента трения и линейных размеров резинометаллических пар трения синхронизированы. Методом гармонического анализа циклических триботехнических характеристик показано, что скорость изнашивания пары трения прямо пропорциональна средней амплитуде циклов периодических изменений линейных размеров, а также коррелирует с величиной теплового расширения трибосистемы. Экспериментально установлено, что исследованные резинометаллические трибосистемы обладают "памятью фазы". Показано, что в процессе трения периодические изменения линейного размера резинометаллической пары, работающей в условиях жидкой смазки,

обусловлены изменением поверхностной энергии, и, как следствие этого, - изменением толщины смазочного слоя в зазоре.

Установлено, что нанесение на поверхность резины тонкого покрытия на основе фторполимера позволяет значительно уменьшить поверхностную энергию (до 8-ми раз), особенно ее полярную составляющую и, соответственно, адгезионное взаимодействие при трении, при этом существенно снижается скорость изнашивания и момент трения пары, работающей в жидкой смазке. Модифицирование резины позволяет стабилизировать процесс трения, значительно снизить, а в отдельных случаях полностью устранить (в пределах точности фиксирующего прибора) периодические изменения триботехнических характеристик резинометаллических пар трения.

Выявлены закономерности изнашивания модифицированных резин. Показано, что износостойкость модифицированных резин по сравнению с немодифицированными при оптимальных режимах эксплуатации возрастает в 2-5 раз. При этом средний размер частиц износа снижается, и изнашивание имеет преимущественно усталостную природу. При оптимальных режимах модифицирования эффект снижения интенсивности изнашивания и коэффициента трения проявляется при линейном износе поверхностных слоев до 50-70 мкм, что значительно превышает эффективную толщину полимерных покрытий (до 2-х мкм) и может свидетельствовать о диффузии активных частиц фторполимера в объем резины на стадии осаждения покрытия и возможности модифицирования поверхностных слоев в процессе трения.

Практическая значимость полученных результатов.

Усовершенствована методика настройки трибоанализатора ТЭЛW-3, позволяющая повысить точность непрерывного контроля линейных размеров в процессе трения.

Установлена корреляция между тепловым расширением и скоростью изнашивания трибосопряжений. На этом основании предложена методика контроля износа пар трения, защищенная патентом РФ.

Определены оптимальные режимы эксплуатации модифицированных пар трения. Показано, что покрытие из ПТФЭ характеризуется наиболее высокими триботехническими свойствами при эксплуатации в среде дизельного топлива при давлении до 0,4 МПа и скорости скольжения до 0,3 м/с, в среде масла - до 0,2 МПа и 0,5 м/с соответственно. Многослойное покрытие ПУ+ПТФЭ обладает наиболее высокими триботехническими свойствами при номинальном давлении в 1,7 и скорости скольжения в 1,3 раза выше в среде дизельного топлива и 2 раза в среде масла, чем покрытие из ПТФЭ. Наиболее оптимальный режим эксплуатации комбинированных покрытий ПУ+ПТФЭ(1:1) и ПУ+ПТФЭ(1:1)+ПТФЭ при давлениях в 2 раза выше и скорости скольжения выше в 1,7 в среде дизельного топлива, и в 2,2 раза в среде масла, чем покрытие из ПТФЭ.

РТИ, с нанесенными на них покрытиями, используются в сальниках привода масляного и водяного насосов дизеля Д50, а также в качестве

уплотнений переднего редуктора тепловоза ТЭЗ.

Экономическая значимость полученных результатов.

Использование модифицированных в активной газовой фазе резин при оптимальных режимах и условиях эксплуатации позволяет повысить их ресурс в 2-5 раз при затратах на дополнительную обработку не превышающих 38% от стоимости немодифицированных РТИ. Это обеспечивает значительную экономию полимерных материалов, финансовых средств, затрат на ремонт и обслуживание узлов трения. Затраты на закупку, монтаж и наладку оборудования окупаются в течение 1,6 года. Коэффициент эффективности составляет более 60 %.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Данные о периодическом согласованном изменении линейного размера и момента трения в процессе трения резин в среде жидкой смазки, и влияние на них поверхностного модифицирования.
2. Описание механизма циклических изменений триботехнических характеристик резинометаллических пар, работающих в среде дизельного топлива, обусловленных периодичностью адсорбционной активности поверхности резин в процессе трения, и механизм влияния модифицирования на циклические процессы.
3. Результаты гармонического анализа изменений триботехнических характеристик материалов, которые позволяют установить связь и взаимное влияние параметров периодических изменений линейных размеров и эксплуатационных параметров резинометаллических пар трения.
4. Методика измерения и настройки трибоанализатора, позволяющая осуществлять с высокой точностью непрерывный контроль линейных размеров трибосопряжений в процессе их работы.
5. Оптимальные режимы эксплуатации модифицированных резинометаллических пар с комбинированными и многослойными покрытиями ПУ+ПТФЭ, которые работоспособны в широком интервале скоростей скольжения и при достаточно высоких давлениях, и с покрытием из ПТФЭ, которое рекомендуется применять для резин, работающих в низконагруженных и малоскоростных узлах трения.

Личный вклад соискателя. Автор принимал непосредственное участие в постановке задач исследования [2-4,6,7,9,11,14,16], проведении экспериментов [4,6,7,9,11,13-16], разработке метода контроля изнашивания [2,3,12,13], способа диагностики изнашивания [5,17], анализе экспериментальных и теоретических результатов [1-4,6,7,11,14,16,17], подготовке публикаций [1-8,10-15,17]. Им самостоятельно выполнена экспериментальная работа по изучению закономерности изменения линейных размеров резинометаллических трибосопряжений [4,8,15], влияния условий и режимов контактного взаимодействия на триботехнические характеристики резинометаллических пар трения [11,6,14,16,7].

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований и их практического применения доложены и обсуждены на международных и республиканских научно-технических и практических конференциях: международная конференция “Современные проблемы машиностроения”, Гомель, 1996; международная конференция “Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии”, Гродно, 1996; международная научно-практическая и методологическая конференция “Проблемы развития локомотивного хозяйства Республики Беларусь”, Гомель, 1996; международная конференция “Проблемы безопасности на транспорте”, Гомель, 1997; республиканская конференция “Физика конденсированных сред”, Гродно, 1997; международная конференция “Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин”, Новополоцк, 1997; международная конференция “Надежность и безопасность технических систем”, Минск, 1997; международная конференция “Актуальные проблемы развития транспортных систем”, Гомель, 1998; республиканская конференция “Физика конденсированных сред”, Гродно, 1998; международная конференция “Композиционные материалы в промышленности”, Киев, 1999; международная конференция “Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения”, Полоцк, 2001.

Опубликованность результатов. Результаты диссертации опубликованы в 17 работах, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах, патент Республики Беларусь, 4 статьи в сборниках материалов конференций и 8 тезисов докладов. Общее количество страниц – 44.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из общей характеристики работы, введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Содержание диссертации изложено на 117 страницах машинописного текста из которых 23 стр. занимают 38 иллюстраций и 17 таблиц. 10 стр. – список использованных источников, включающий в себя 139 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится общая оценка современного состояния решаемой проблемы, исходные данные для исследования, обоснование необходимости проведения работы и ее общая характеристика.

В первой главе выполнен анализ режимов и условий эксплуатации РТИ на основе бутадиенитрильного каучука. Приведена краткая характеристика физико-механических свойств резин, показаны особенности влияния структуры и состава резин на их триботехнические свойства. Проведен анализ известных методов поверхностного модифицирования резин и рассмотрены их особенности. Рассмотрено влияние результатов поверхностного модифицирования различными методами на трение и изнашивание резин. Приводятся значения триботехнических свойств модифицированных РТИ и дан анализ методов их определения. Описаны кинетические закономерности

работы различных трибосопряжений. На основе вышеизложенного сформулированы цель работы и задачи исследования.

Вторая глава содержит описание методики и оборудования для определения физико-механических свойств и триботехнических испытаний резинометаллических пар трения, имеющих на рабочих поверхностях термостойкие композиционные полимерные покрытия.

Триботехнические испытания модифицированных резин осуществлялись экспрессным методом по схеме стальной вал – резиновый частичный вкладыш как без смазки, так и со смазкой погружением. Вал диаметром 40 мм и толщиной 10 - 12 мм изготавливался из стали ШХ-15 (ГОСТ 801-78). Твердость вала составляла HRC 51 ... 55. РТИ были изготовлены из резин на основе бутадиенитрильного, силоксанового и фторкаучука.

Все триботехнические испытания проводились с использованием машин трения 2070 СМТ-1 (ПО “Точмаш” Россия), а так же специальных стендов, эмитирующих работу резинометаллических трибосопряжений.

Подача смазочного материала к поверхности трения осуществлялась частичным погружением металлического образца. В качестве смазочного материала использовались масла: компрессорное КС-19 (ГОСТ 20799-75), дизельное М14Б (ГОСТ 38-101-264-72), индустриальное И-20А (ГОСТ 20799-75). Испытания проводились также в среде дизельного топлива Д-68 (ГОСТ 5105-82).

Для анализа структуры поверхности исходных резин, а также резин с комбинированными и многослойными покрытиями использовался метод оптической и атомно-силовой микроскопии.

Для измерения износа пар трения применялся метод, основанный на использовании трибоанализатора PCLW-01, а также метод, реализующий стандарт ASTM G77.

Поверхностное модифицирование резин проводилось в активной газовой фазе, создаваемой диспергированием в вакууме ПТФЭ и ПУ потоком электронов, поскольку данный метод не требует больших затрат, позволяет получать тонкие покрытия различного состава и обладающие высокой адгезией к подложке. При реализации данного способа использовалась установка УРМ 3.279.048 с вмонтированным в камере электронно-лучевым диспергатором “Элорма-1”. В результате на поверхность осаждалось покрытие с эффективной толщиной от 0,1 до 2 мкм. Модифицирование проводилось по следующим основным режимам (табл. 1).

Учитывая специфику работы резинометаллических пар трения и малую толщину вакуумных покрытий (до долей микрометра), была разработана методика контроля “in situ” линейных размеров трибосопряжений непосредственно в процессе трения, предусматривающая использование трибоанализатора PCLW-01 (рис. 1.).

Режимы поверхностного модифицирования резин

Режим обработки	Эффективная толщина слоя, мкм	Состав модифицирующего слоя	Технологические особенности процесса модифицирования
1	0,8-1,2	ПТФЭ	Осаждение из активной газовой фазы, образованной диспергированием ПТФЭ
2	1,2-1,6	ПУ+ПТФЭ (соотношение 1:1)	Покрытие образованно диспергированием смеси ПУ+ПТФЭ
3	1,2-1,6	ПУ+ПТФЭ (соотношение компонентов 1:2)	Покрытие образованно диспергированием смеси ПУ+ПТФЭ, затем осаждение слоя ПТФЭ
4	1,4-1,8	ПУ+ПТФЭ	Покрытие образованно диспергированием ПУ, затем осаждение слоя ПТФЭ

Прибор содержит корпус 10, закрепленный на неподвижном основании. На корпусе установлен узел настройки, состоящий из регулировочного винта 9, скобы 8, основного стержня 6 и датчика перемещений 7.

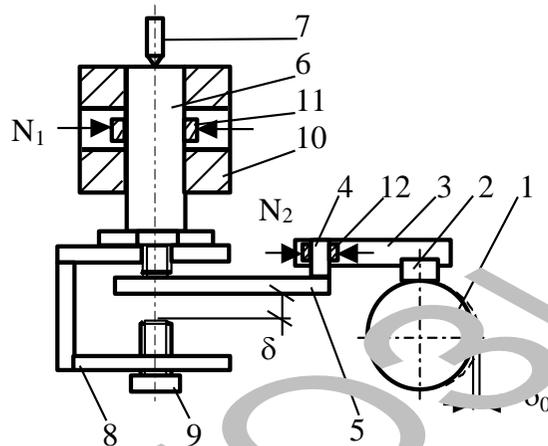


Рис. 1. Упрощенная схема трибоанализатора PCLW-01

С узлом настройки контактирует боковой упор 5 дополнительного стержня 4, расположенного в держателе 3, который, в свою очередь, служит для нагружения узла трения, состоящего из образца 2 и контртела 1. Подвижность основного и дополнительного стержня регулируется силой затяжки фрикционов 11,12.

Эффективное использование данного устройства возможно только при условии его правильной настройки и регулировки, основная цель которой - снизить влияние биения трибосистемы на точность измерения. Для этого при испытании конкретных узлов трения с учетом режима их работы необходимо

установить оптимальные силы затяжки фрикционов 11,12 и величину рабочего зазора δ узла настройки измерительной схемы прибора.

Показано, что минимальные силы трения между основным и дополнительным датчиками с соответствующими фрикционами могут быть определены из следующих выражений:

$$F_1 = m_1 \left(g + \frac{\delta_0 \omega^2}{2} \right); \quad F_2 = F_K + m_2 \omega^2$$

где: m_1 - масса узла настройки; m_2 - суммарная масса деталей 4,5; δ_0 - величина радиального биения деталей трибосистемы; ω - угловая скорость контртела; F_1, F_2 - минимальные расчетные значения сил трения на фрикционах; F_K - сила контакта при движении стержня вверх.

Усилия затяжки как догоняющих фрикционов определяются по минимальным расчетным значениям силы трения, величина рабочего зазора δ выбирается из экспериментально полученных графиков.

С учетом рекомендаций для пользователя предложен алгоритм определения параметров оптимальной настройки трибоанализатора PCLW-01. Проведенные эксперименты подтвердили высокую эффективность разработанной методики.

Для обработки результатов триботехнических испытаний материалов использована методика гармонического анализа, в соответствии с которой триботехнические характеристики, имеющие циклический характер изменения, представлялись в виде ряда

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

где $A_0, A_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$ ($n=1,2,3,4$) - гармоники функции $f(t)$, A_n - амплитуда, ω - частота, φ_n - начальная фаза гармоники. Статистическая обработка результатов исследований выполнялась с помощью ЭВМ.

В третьей главе содержится описание кинетических закономерностей трения и изнашивания исходных резин и модифицированных путем нанесения композиционных полимерных покрытий в активной газовой фазе.

Сравнительные исследования свойств модифицированных РТИ различной природы показали, что модифицирование наиболее эффективно для резин на основе бутадиеннитрильного каучука. Так, модифицирование позволяет снизить коэффициент трения резин из этого каучука в 7,2 раза, из силиконовое - в 2,7 раз, из фторкаучука - в 3,9 раз. Кроме этого, РТИ на основе бутадиеннитрильного каучука характеризуются высокими технико-экономическими показателями, и, по этому, наиболее часто применяются в качестве материала уплотнений. Исходя из этих соображений, в дальнейшей работе исследовались резины на основе данного каучука.

Установлено, что в процессе трения имеют место согласованные периодические изменения момента трения и линейных размеров пары сталь - резина, работающей в среде жидкого смазочного материала (рис. 2.).

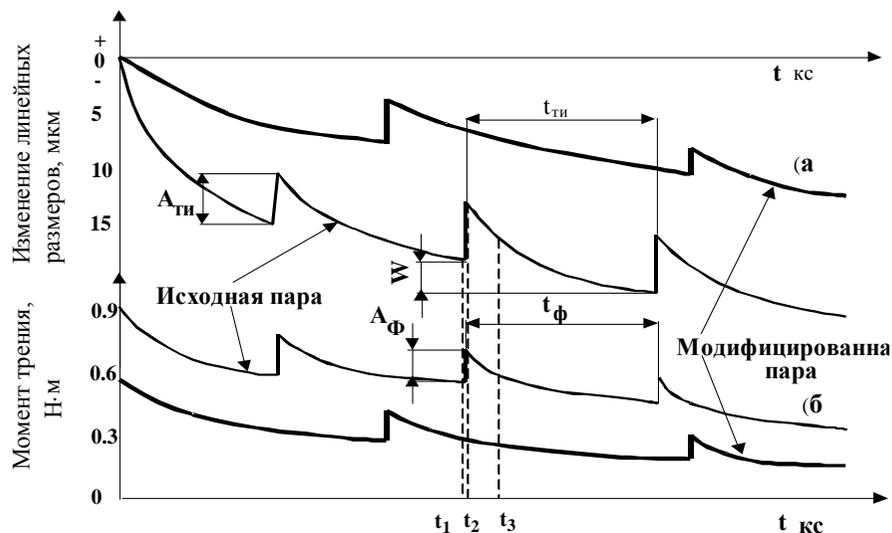


Рис.2. Изменение триботехнических характеристик резинометаллических сопряжений, работающих в среде топлива (а - изменение линейных размеров, б - изменение момента трения).

В определенный момент времени в течение $\Delta t = t_2 - t_1 = 2$ с происходит резкое увеличение линейного размера пары и момента трения. Затем значения триботехнических характеристик постепенно уменьшаются и система переходит в квазистационарный режим работы. Данные изменения неоднократно повторяются в процессе работы пары. У резинометаллических сопряжений, работающих без смазки, такие процессы не зафиксированы.

Приведен анализ основных параметров, в качестве которых выбраны амплитуды линейных размеров $A_{ти}$ и момента трения $A_{ф}$, продолжительность циклов $t_{ти}$ и $t_{ф}$, а также уменьшение линейного размера пары за один цикл W .

Используя методику гармонического анализа, экспериментальные значения амплитуд циклов изменений линейных размеров и момента трения трибосистем были представлены в виде соответствующих гармонических рядов. Так, для кинетических изменений линейных размеров резинометаллической пары с шероховатостью поверхности стального элемента $R_a = 0,093$ мкм было получено следующее уравнение:

$$A_{ти,0.093}(t) = 5,417 + 2,4282 \sin(t + 2,7920) + 1,9597 \sin(2t + 1,6076) + 1,4767 \sin(3t - 2,8555) + 3,2479 \sin(4t - 0,0128).$$

Коэффициент корреляции между амплитудными термоизносными и фрикционными характеристиками, построенными с использованием тригонометрических многочленов и на основе экспериментальных значений составляет порядка 0,8.

Показано, что временные характеристики, как амплитудные, так же могут быть представлены соответствующими гармоническими рядами. Установлена в виде корреляционных квадратов взаимосвязь между расчетными и экспериментальными значениями соответствующих амплитудных и временных характеристик. Определено также оптимальное число гармоник гармонического ряда ($N=5$), обеспечивающее точное описание процесса трения.

Изменение триботехнических характеристик наблюдаются как у исходных пар, так и у модифицированных. Однако для последних величины амплитуды значительно меньше и циклы наблюдаются реже.

Для изученных систем показано, что скорость изнашивания трибосистем прямо пропорциональна средней величине амплитуд циклов ($A_{ти}$) резинометаллических сопряжений.

Периодическое изменение триботехнических характеристик резинометаллических пар происходит по следующему механизму. В процессе работы трибосопряжения в приповерхностных слоях резины протекает деструкция макромолекул, их разрыв, вызванные силами трения, набуханием и действием агрессивных смазочных жидкостей, накапливаются повреждения. Когда сила трения становится больше когезионной прочности отдельных микрообластей поверхностного слоя резины, они разрушаются, образуя "новую" поверхность, что влечет за собой изменение поверхностной энергии и, соответственно, толщины смазочного слоя (табл. 2), которая тем больше, чем больше значение поверхностной энергии резины. Так же происходит резкое увеличение момента трения ввиду высокого адгезионного взаимодействия образовавшейся поверхности резины с металлом. Причем эти особенности сохраняются даже в случае, когда трение осуществляется в режиме "пуск-стоп".

Таблица 2

Значение поверхностной энергии и количество смазочного материала на поверхности исходного резинового образца в характерных точках изменения линейных размеров трибосопряжения (см. рис. 2)

Параметры	Значения, соответствующие точкам, указанным на рис. 2		
	t_1	t_2	t_3
Дисперсионный компонент, мДж/м ²	4,7	4,13	-

Полярный компонент, мДж/м ²	31,6	38,67	-
Поверхностная энергия, мДж/м ²	36,3	42,8	-
Количество смазки на поверхности резины, мг	2,3	5,1	3,7

Пара трения: стальной ролик - резиновый вкладыш, нагрузка P=50Н, скорость v=0,5 м/с.

При дальнейшей работе пары в поверхностном слое протекают значительные изменения, он окисляется, накапливаются повреждения, уменьшается поверхностная энергия резины, толщина смазочного слоя, коэффициент трения, и постепенно трибосистема возвращается в состояние, характерное для момента t₁. Затем, циклы неоднократно повторяются.

Поверхностное модифицирование резины заметно изменяет ее триботехнические характеристики (табл. 3).

Таблица 3

Триботехнические характеристики, полученные по результатам испытаний резинометаллических трибосопряжений (p=0,1 МПа, v=0,3 м/с).

Резина	Скорость изнашивания J _n , м/с	Коэффициент трения, f	Пов-я энергия E, мДж/м ²	Средняя амплитуда циклов A, мкм	Изменение линейных размеров после остановки Δ, мкм
Исходная резина	8,6·10 ⁻⁹	0,542	44,6	6,0	3,5
Модиф. резина. Режим № 1	8,1·10 ⁻⁹	0,475	6,7	4,4	9,5
Режим № 2	5,6·10 ⁻⁹	0,367	24,5	1,3	7,9
Режим № 4	5,3·10 ⁻⁹	0,275	10,6	0	8,0
Режим № 3	5,7·10 ⁻⁹	0,250	5,2	3,6	8,1

Пара трения: стальной ролик - резиновый вкладыш, смазочная среда - дизельное топливо.

Так, в результате модифицирования резины значительно стабилизируется процесс трения (табл. 3, снижение величины Δ), уменьшается скорость изнашивания J_n и коэффициент трения f резинометаллических трибосопряжений.

В процессе испытаний установлена корреляция между тепловым расширением Δ_т деталей трибосистемы и их скоростью изнашивания V_W: при повышении V_W наблюдается увеличение Δ_т. Данная зависимость характерна как для модифицированных, так и для исходных пар трения, и на ее основании разработан способ контроля величины износа (патент РБ 3443). Его сущность заключается в том, что в процессе работы фиксируют тепловое расширение детали, зная которое по экспериментально установленным ранее зависимостям, определяют ее скорость изнашивания.

Изучена кинетика изменения триботехнических свойств модифицированных резин. Установлено, что при изнашивании

модифицированных РТИ наблюдается монотонное изменение поверхностной энергии (рис. 3) и коэффициента трения. Это свидетельствует о том, что обработка не является локальной и приводит к изменению свойств в некотором поверхностном слое толщиной порядка 50 мкм.

Можно предположить, что при модифицировании в активной газовой фазе фрагменты макромолекул полимера проникают в глубь резины более чем на 30-40 мкм, адсорбируются в этом поверхностном слое и оказывают свое положительное действие на процесс трения.

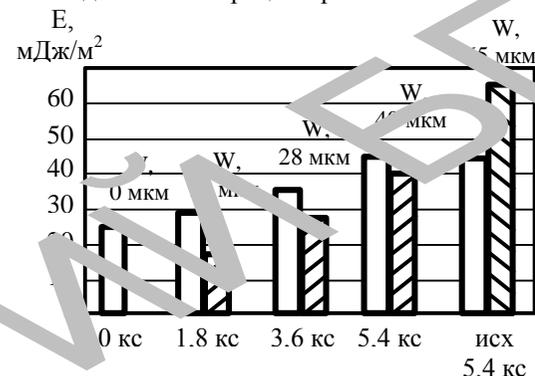


Рис. 3. Изменение поверхностной энергии (□) и износа модифицированного (режим модифицирования 2) (▨) резинового вкладыша в процессе работы.

В качестве одной из причин реализации высокого ресурса работы модифицированных резин можно отметить протекание процессов фторирования приповерхностных слоев в результате насыщения фтором, образующимся в процессе нанесения покрытий, а также при деструкции фторполимера при трении.

Отметим, что модифицирование металлической поверхности путем нанесения полимерного покрытия оказывает заметное влияние только на начальных стадиях трения.

В четвертой главе проведен анализ влияния условий и режимов контактного взаимодействия на эксплуатационные свойства модифицированных резин.

Установлено, что поверхностное модифицирование практически не изменяет объемные свойства резин. Величина относительной остаточной деформации, твердость, коэффициент морозостойкости.

Исследования влияния скорости скольжения на триботехнические характеристики резинометаллических трибосопряжений показали, что в среде дизельного топлива модифицированные РТИ работоспособны при скоростях скольжения до 0,3 м/с, тогда как в среде масла с увеличением скорости скольжения с 0,1 м/с до 1,3 м/с эффективность модифицирования возрастает, что объясняется разной вязкостью смазочных жидкостей.

Установлено, что модифицирование резины эффективно при шероховатости стального элемента пары до $R_a=0,5$ мкм. По-видимому при большей шероховатости выступы быстро срезают модифицированный слой резины. Изменение шероховатости резины в исследуемом диапазоне (до $R_a=1,5$ мкм) практически не влияет на триботехнические характеристики модифицированной пары.

Для оценки совместного влияния скорости, нагрузки и вида покрытия был проведен полный факторный эксперимент 2³. По его результатам получены уравнения регрессии для момента трения и износа модифицированных резинометаллических пар с резинами, имеющими на своей поверхности различные покрытия. Выводы, сделанные на основе анализа этих уравнений, в дальнейшем подтверждены экспериментально и использованы при выборе оптимальных режимов эксплуатации.

Исследования влияния природы смазочной среды на триботехнические характеристики резинометаллических пар показали, что наиболее эффективно модифицирование РТИ у трибосопряжений, работающих в более вязкой смазочной среде.

Модифицирование РТИ значительно уменьшает поверхностную энергию E (таб. 3), что ведет к изменению характера смачивания. Из зоны трения выдавливается большая часть смазочной жидкости, и работа модифицированной пары проходит в режиме близкой к граничной смазке. Как показали эксперименты, модифицирование поверхностей РТИ резинометаллических трибосопряжений, работающих без смазки, дает незначительный положительный эффект.

Установлено, что введение в состав исследуемой трибосистемы тонкослойного композиционного полимерного покрытия по своему характеру оказывает действие, аналогичное уменьшению величины нагрузки, прикладываемой к испытываемому трибосопряжению (табл. 3). Это обуславливает локализацию процессов трения и изнашивания в более тонких приповерхностных слоях материалов и, как следствие, ведет к уменьшению среднего размера частиц износа (подтверждается исследованием размеров частиц износа). Предполагается, что происходит переход от изнашивания по механизму образования “скатов” у исходных резин к усталостному изнашиванию у модифицированных, что позволяет значительно снизить потери при трении.

При нанесении на поверхность резин многослойного покрытия из ПУ и ПТФЭ, эти полимеры, делая друг друга, оказывают значительное влияние на процесс изнашивания резинометаллической пары. Так полиуретан (полиэтилен, благодаря своим триботехническим свойствам (изнашивание с металлом и др.) заметно снижает коэффициент трения. Однако, фторопласт быстро уходит из зоны трения, о чем свидетельствует срываемость покрытия, полученного по режиму 1. Полиуретан, напротив, не оказывая заметного влияния на триботехнические характеристики, является как бы каркасом для ПТФЭ, о чем свидетельствует низкий износ пары с покрытием (ПУ+ПТФЭ)(1:1) (режим модифицирования 2).

При трении резинометаллической пары с покрытием ПУ+ПТФЭ (режим модифицирования 4) последний, находясь над слоем ПУ, активно изнашивается, о чем свидетельствует более высокий износ и более низкий момент трения данного трибосопряжения, чем у пары с покрытием (ПУ+ПТФЭ)(1:1) (режим модифицирования 2).

Трибосопряжения с комбинированным покрытием ПУ+ПТФЭ(1:1)+ПТФЭ (режим модифицирования 3) имеют низкий момент трения как и пары с покрытием ПУ+ПТФЭ, а также малую скорость изнашивания как у пар с покрытием ПУ+ПТФЭ(1:1) (режим модифицирования 2).

Установлено, что изменение адсорбционных свойств резин в результате поверхностного модифицирования является основной причиной изменения линейного размера Δ (таблица 3), наблюдающегося после остановки трибосистемы. Это значение у модифицированных пар сталь-резина больше в 2-3 раза чем у исходных. В общем случае изменение линейных размеров трибосистемы, эксплуатирующейся в среде смазочного материала, можно определить:

$$\Delta = \Delta_T - W + \Delta_d + \Delta_c,$$

где: Δ_T – тепловое расширение; W – износ; Δ_d – деформация резинового вкладыша; Δ_c – изменение толщины слоя смазочного материала в зазоре ролик-вкладыш.

На основании влияния момента трения на тепловое расширение (Δ_T) было получено уравнение:

$$\Delta_T = (\mu \nu \sigma / (\varphi_1 \lambda_1 d_2 + \varphi_2 \lambda_2 d_1)) d_1 d_2 (\alpha_1 d_1 f_1(\varphi_1) + \alpha_2 d_2 f_2(\varphi_2)).$$

где: α_1 и α_2 – коэффициенты теплового расширения ролика и вкладыша соответственно; d_1 и d_2 – характерные размеры ролика и вкладыша соответственно; $f_1(\varphi_1)$ и $f_2(\varphi_2)$ – функции, зависящие от распределения температурных полей в поверхностных слоях ролика и вкладыша, условий теплообмена; μ – коэффициент трения; ν – скорость скольжения; σ – нормальное давление; λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности ролика и вкладыша соответственно; φ_1 и φ_2 – функции, зависящие от геометрических параметров трибосистемы.

Анализ данных уравнений показал, что определяющее влияние на линейный размер трибосистемы оказывает изменение толщины смазочного слоя Δ_c в зазоре ролик-вкладыш. В узле трения, содержащем немодифицированный резиновый вкладыш, поверхностная энергия которого относительно велика, после его остановки и охлаждения удерживается более толстый слой смазки и, как следствие этого, изменение линейного размера системы незначительно.

Ресурсные испытания покрытий, проведенные в режиме интенсивного изнашивания, подтвердили ранее полученные результаты о совместном влиянии ПУ и ПТФЭ (табл. 4).

Таблица 4

Время достижения модифицированными по различным режимам

резинометаллическими трибосопряжениями момента трения исходной пары

Покрытие	Реж. 1	Реж. 2	Реж. 3	Реж. 4
Время достижения, кс	1.07	3.25	3.63	1.51

Данные, полученные на стенде, эмитирующем работу реального узла трения, качественно подтвердили результаты экспериментов, полученные на машине трения.

На основании анализа результатов проведенных исследований влияния режимов диспергирования на триботехнические свойства модифицированных резин предложены оптимальные параметры эксплуатации модифицированных РТИ.

Экономический расчет показал, что при увеличении затрат на модифицирование на 38 % срок службы РТИ увеличивается в 2-5 раз. Результаты экспериментов использовались при организации технологических участков по нанесению тонких полимерных покрытий из активной газовой фазы на машиностроительные изделия на Гомельском электромеханическом заводе, Гродненском заводе карданных валов и на Минском мотовелозаводе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определен механизм периодических изменений линейных размеров модифицированных и немодифицированных РТИ. Показано, что кинетические особенности изменения линейного размера пары резин-металл обусловлены изменением в процессе трения соотношения поверхностных слоев резин, увеличением их адсорбционной активности, и, как следствие этого, толщины слоя смазки в зоне контакта. Данный вывод сделан на основании анализа результатов измерения поверхностной энергии резин, ее полярной и дисперсионной составляющих. Методом гармонического анализа установлено, что скорость изнашивания пропорциональна средней амплитуде циклов и коррелирует с тепловым расширением. Предложены аналитические выражения, описывающие изменения линейных размеров в процессе трения. Показано, что кинетические зависимости коэффициента трения и линейного размера характеризуются эффектом “памяти фазы”, который заключается в сохранении характера кинетических изменений при работе пары трения в режиме “пуск - стоп” [5, 8, 10, 17].
2. Установлены параметры периодических изменений триботехнических характеристик резинометаллических пар трения, работающих в среде смазочного материала, при различных режимах модифицирования. Определено, что время начала и продолжительность циклов изменения линейных размеров трибосопряжения и момента трения синхронизированы. [4, 15].
3. Показано, что плазмохимическое модифицирование изменяет характер изнашивания и обеспечивает (в 2 раза и более) снижение коэффициента

трения резинометаллических трибосопряжений, работающих в среде смазочного материала, и уменьшение (в 1,7 раза) износа РТИ. Отмечено, что модифицирование резин стабилизирует процессы трения и обеспечивает высокую работоспособность резинометаллических пар при линейном износе РТИ до 50 мкм, что объясняется образованием диффузионного модифицированного слоя и изменением свойств поверхности контртела [6, 7, 9, 11, 14, 16].

4. Усовершенствована методика контроля “in situ” изменений линейных размеров трибосопряжения непосредственно в процессе трения, которая предусматривает использование трибоанализатора РСЛW-01. Предложен алгоритм настройки прибора, позволяющий снизить влияние биения элементов трибосистемы на точность измерения [2, 3, 13].
5. Установлены оптимальные режимы эксплуатации модифицированных РТИ и разработаны рекомендации по их применению. Предложено использовать однослойные покрытия из ПТФЭ в малонагруженных, низкоскоростных узлах трения со скоростями скольжения порядка 0,3 м/с и давлением в зоне контакта до 0,15 МПа – в среде дизельного топлива и до 0,2 МПа – в среде масла. Многослойное покрытие ПУ+ПТФЭ рекомендуется использовать в узлах трения, работающих со скоростью скольжения до 0,5 м/с – в среде дизельного топлива и до 1,1 м/с – в среде масла, и нагрузке до 0,25 МПа – в среде дизельного топлива и до 0,35 МПа – в среде масла. Комбинированные покрытия ПУ+ПТФЭ(1:1) и ПУ+ПТФЭ(1:1)+ПТФЭ работоспособны при нагрузках до 0,3 МПа – в среде дизельного топлива и до 0,4 МПа – в среде масла, и скоростях скольжения до 0,4...0,5 м/с – в среде дизельного топлива и до 1...1,1 м/с – в среде масла. Причем покрытие ПУ+ПТФЭ(1:1) целесообразно использовать с целью обеспечения постоянства линейных размеров, тогда как применение покрытий ПУ+ПТФЭ(1:1) +ПТФЭ позволяет длительное время поддерживать постоянство момента трения. Модифицированные РТИ используются в сальниках привода масляного и водяного насосов дизеля Д50, а также в качестве уплотнений переднего редуктора тепловоза ТЭЗ, что позволило повысить их ресурс в 2-5 раз при затратах на дополнительную обработку не превышающих 38% от стоимости немодифицированных РТИ [4, 8, 14].

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Потеха В. Л., Петров С. В. Гармонический анализ результатов трибологических испытаний резинометаллических сопряжений// Известия Национальной Академии наук Беларуси. – 1998.- № 4.- С.78-83.
2. Шимановский А. О., Потеха В. Л., Петров С. В. Расчет и экспериментальная проверка работоспособности устройства для оценки износостойкости деталей транспортных средств//Измерительная техника. –1998.- № 8.- С. 33-35.

3. Потеха В. Л., Петров С. В. Метод дилатометрического контроля изнашивания материалов // Заводская лаборатория. –1998.- № 8. -С. 52-55.
4. Петров С. В., Рогачев А. В., Щебров А. В., Потеха В. Л. Изучение механизма периодических изменений линейных размеров резинометаллических трибосопряжений в процессе трения // Трение и износ. –Т.20.-1999.-№6.-С.669-673.
5. Потеха В. Л., Напреев И. С., Петров С. В. Термодиагностирование трибосопряжений транспортной техники // Современные проблемы машиностроения: Материалы науч. тех. конф. -Гомель, -1996.- С. 86-87.
6. Потеха В. Л., Петров С. В. Трибологические характеристики модифицированных резино-металлических уплотнений железнодорожных транспортных средств // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: Тематический сборник, выпуск №3. -Новополоцк, -1997.- С. 154.
7. Сидорский С.С., Рогачев А.В., Петров С.В., Щебров А.В. Влияние обработки резин в активной газовой фазе на их триботехнические свойства.//Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения. Сборник научных трудов, ПГУ. Полоцк, 2001.-С. 231-234.
8. Rogachev A.V., Petrov S.V., Sidorsky S.S., Schebrov A.V. Tribological properties of the rubbers, modified by means of active gas phase. // Seals and sealing technology in machines and devices. IX International conference. Wroclaw-Pjlanica Zdroj, May, 22-24, 2001. - С. 25-28.
9. Казаченко В. П., Рогачев А. В., Петров С. В. Восстановление прецизионных поверхностей трения методами вакуумной технологии // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии: Тез. докл. науч. тех. конф. -Гродно, 8 октября, 1996.- С. 130-131.
10. Потеха В. Л., Напреев И. С., Петров С. В. Термодиагностирование трибосопряжений железнодорожного транспорта // Проблемы развития локомотивного хозяйства республики Беларусь: Тез. докл. науч. практ. метод. конф. -Гомель, -1996.- С. 19.
11. Петров С.В. Исследование влияния тонких покрытий из фторопласта, нанесенных в вакууме, на триботехнические характеристики пары сталь-резина // Физика конденсированных сред: Тез. докл. науч. конф. - Гродно, 1997. С. 130-131.
12. Шимановский А. О., Потеха В. Л., Петров С. В. Расчет и экспериментальная проверка работоспособности устройства для оценки износостойкости узлов транспортных средств // Проблемы безопасности на транспорте: Тез. докл. науч. практ. конф. -Гомель, 1997.- С. 69.
13. Потеха В. Л., Петров С. В. Методика дилатометрического контроля трибосистем // Надежность и безопасность технических систем: Тез. докл. науч. тех. конф. - Минск, - 28-29 октября, 1997.- С.110-112
14. Петров С.В. Влияние шероховатости на износ модифицированных резинометаллических пар трения.// Физика конденсированных сред: Тез. докл. науч. конф. - Гродно, 1998.- С. 158
15. Петров С. В. Исследование кинетики изменений триботехнических характеристик резинометаллических пар трения.// Актуальные проблемы развития транспортных систем. Тез. докл. науч. тех. конф. – Гомель, 1998.- С. 39.
16. Рогачев А. В., Казаченко В. П., Шибров А. В., Петров С. В. Триботехнические свойства поверхностей модифицированных резин.//Композиционные материалы в промышленности. Тезисы докладов МНТК, Киев, АТН, Украина, 1999.- С. 146-147.
17. Пат. РБ 2443, МКИ G 01N 3/56, 25/16. Способ диагностики изнашивания материалов / Потеха В. Л., Рогачев А. В., Напреев И. С., Петров С. В. № 970101; Заявл. 28.02.97; Опубл. 30.06.00 // Официальный бюллетень. Вынаходствы, карысныя мадэлі, апрамысловыя ўзоры.— 2000, №2.

РЭЗЮМЕ

ПЯТРОЎ СЯРГЕЙ ВІКТАРАВІЧ

ТРЫБАТЭХНІЧНЫЯ ЎЛАСЦІВАСЦІ ГУМ, ПАВЕРХНЕВА – МАДЫФІКАВАНЫХ У АКТЫЎНАЙ ГАЗАВАЙ ФАЗЕ

Ключавыя словы: трыбаспалучэнне, гума, трыбатэхнічныя ўласцівасці, мадыфікацыя, поліэтрафторэтылен, поліурэтан.

Аб’екты даследавання: гумы зыходныя, пераважна на аснове бутадыеннітрыльнага каўчука, і мадыфікаваныя нанясеннем камбінаваных пакрыццяў з поліурэтану і поліэтрафторэтылену з актыўнай газавай фазы.

Прадмет даследавання: трыбатэхнічныя ўласцівасці гум.

Мэта работы: даследаванне трыбатэхнічных уласцівасцей і механізму зношвання гум, паверхнева мадыфікаваных у актыўнай газавай фазе, распрацоўка на аснове атрыманых вынікаў рэкамендацый па іх эфектыўнаму практычнаму выкарыстанню ў рухомах гума-металічных канструкцыях.

Метады даследавання і апаратура: Для вызначэння зносу пар трэння прымянялася удасканаленная аўтарам метадыка кантролю “in situ”

змінення лінійних памераў трыбаспалучэнняў непасрэдна ў працэсе трэння. Энергетычныя характарыстыкі паверхні вызначаліся па краёвому вуглу змочвання адпаведных вадкасцей. Аналіз павярхоўнай марфалогіі праводзіўся метадам атамна – сілавой мікраскапіі.

Даследаваны асаблівасці перыядычных змяненняў трыбатэхнічных характарыстык пры розных рэжымах мадыфікацыі. Устаноўлена, што час пачатку і працягласць цыклаў змянення лінейных памераў трыбаспалучэння і моманту трэння сінхронізаваныя. Нанясенне пакрыццяў стабілізуе працэсы трэння і забяспечвае высокую працаздольнасць гума-металічных пар трэння пры лінейным зносе да 50 мкм. Гэта тлумачыцца ўтварэннем дыфузійнага мадыфікаванага слою і магчымым змяненнем уласцівасцей паверхні контрцела. Вызначаны заканамернасці змянення лінейных памераў мадыфікаваных і немадыфікаваных ГТВ. Паказана, што велічыня і характар змянення вызначаюцца таўшчынёй і даўгавечнасцю слою змазкі, якая ўтвараецца ў зоне кантакту. Устаноўлена, што эфектыўнасць мадыфікацыі ГТВ павышаецца з павелічэннем хуткасці слізгання ў асяроддзі масла і зніжаецца ў асяроддзі дызельнага паліва, шурпатаць гумы незначна ўплывае на эфектыўнасць мадыфікавання, тады як мадыфікаваная пара працаздольна пры шурпатаці сталёнага элемента $R_a < 0,5$ мкм, а самі тэрмазносныя характарыстыкі маюць памяць фазы. Устаноўлены аптымальныя рэжымы эксплуатацыі мадыфікаваных ГТВ.

РЕЗЮМЕ

ПЕТРОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕЗИН, ПОВЕРХНОСТИ-МОДИФИЦИРОВАННЫХ В АКТИВНОЙ ГАЗОВОЙ ФАЗЕ.

Ключевые слова: трибосопряжение, резина, триботехнические свойства, модифицирование, политетрафторэтилен, полиуретан.

Объект исследования: резины исходные, преимущественно на основе бутадиеннитрильного каучука, и модифицированные нанесением комбинированных покрытий из полиуретана и политетрафторэтилена из активной газовой фазы.

Предмет исследования: триботехнические свойства резин.

Цель работы: исследование триботехнических свойств и механизма изнашивания резин, поверхностно модифицированных в активной газовой фазе, результаты на основе полученных результатов рекомендаций по их эффективному практическому использованию в подвижных резино-металлических устройствах.

Методы исследования и аппаратура: Для определения износа пар трения применялась усовершенствованная автором методика контроля “in situ” изменения линейных размеров трибосопряжений непосредственно в процессе трения. Энергетические характеристики поверхности определялись по краевому углу смачивания соответствующих жидкостей. Анализ

поверхностной морфологии проводился методом атомно-силовой микроскопии.

Исследованы особенности периодических изменений триботехнических характеристик при различных режимах модифицирования. Установлено, что время начала и продолжительности циклов изменения линейных размеров трибосопряжения и моменты трения синхронизированы. Нанесение покрытий стабилизирует процессы трения и обеспечивает высокую работоспособность резино-металлических пар трения при линейном износе порядка 50 мкм, что объясняется образованием диффузионного модифицированного слоя и возможным изменением свойств поверхности контртела. Определены закономерности изменения линейных размеров модифицированных и немодифицированных РТИ. Показано, что величина и характер изменения определяются толщиной и долговечностью слоя смазки, входящей в зону контакта. Установлено, что эффективность модифицирования РТИ повышается с увеличением скорости скольжения в среде масла и снижается в среде дизельного топлива, шероховатость резины незначительно влияет на эффективность модифицирования, тогда как модифицированная пара работоспособна при шероховатости сталёного элемента $R_a < 0,5$ мкм, а сами термоизносные характеристики образуют память фаз. Определены оптимальные режимы эксплуатации модифицированных РТИ.

SUMMARY

PETROV SERGEJ VIKTOROVICH

TRIBOENGINEERING CHARACTERISTICS OF SURFACE-MODIFIED IN ACTIVE GAS PHASE RUBBERS

Key words: tribojoint, rubber, triboengineering characteristics, modification, polytetrafluorethylene, polyurethane.

Object of the research: the initial rubber and the rubber modified by application of a coating of polyurethane and polytetrafluorethylene in the active gas phase.

Aim of the research: investigation of triboengineering characteristics of rubbers, surface-modified in the active gas phase and their wear mechanism; formulation of recommendations for effective employment in the movable rubber-metal devices.

Research techniques and equipment: A technique developed by the present author to control “in situ” variations in linear dimension of tribojoints directly during friction was used at investigations. Energy characteristics of the surface were determined based on the edge-wetting angle values of certain liquids. The method of atomic-force microscopy was used to analysis of surface morphology.

Periodic variations of tribological characteristics were analyzed at various modification conditions. It was found that the onset and duration of variation cycles of linear dimensions of tribojoints and friction torque are synchronized.

Application of coatings stabilizes friction processes and provides high efficiency of rubber-metal friction pairs at linear wear above 50 micrometers. This can be attributed to diffusion modified layer formation and possible change of the surface characteristics of the counterbody. Regularities of linear dimensions variation of the modified and nonmodified rubber articles have been determined. The magnitude and the character of changes prove to depend on the thickness and durability of a lubricant layer located in the contact zone. It is shown that modification efficiency of articles from industrial rubber rises with increasing sliding speed in oil medium and decreases in diesel fuel medium. Rubber roughness influences modification efficiency insignificantly whereas the modified pair operates at up to 0,5 um roughness of the steel element. Thermal and wear characteristics proved to have phase memory. Optimum operation conditions of the modified rubber articles from industrial rubber have been defined.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ