

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ФТОРПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ В ПРИБОРСТРОЕНИИ

© 2008 г. П.А. ЛУЧНИКОВ, А.А. РОГАЧЕВ, М.А. ЯРМОЛЕНКО,
А.П. ЛУЧНИКОВ, А.В. РОГАЧЕВ

Гомельский государственный университет им. Ф.Скорины, Беларусь
Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики
(технический университет)

Введение

В узлах трибосопряжений оборудования и машин, работающих в циклических экстремальных условиях в контакте с жидкими агрессивными средами, широко распространены резинометаллические узлы трибосопряжений с уплотнителями. Одним из методов повышения ресурса работы таких сопряжений с резинотехническими изделиями (РТИ) можно отнести модификацию контактных поверхностей антифрикционными вакуумными полимерными покрытиями [1,2]. Модификация уплотнительных РТИ путем нанесения вакуумных фторполимерных покрытий на их рабочую поверхность осуществляется из газовой фазы электронно-лучевыми и плазмохимическими методами. Такое модифицирование рабочей поверхности практически не оказывает на объемные показатели РТИ и позволяет существенно снижать коэффициент трения и износ трибопары. При эксплуатации в химически активных средах модифицированные РТИ имеют повышенную стойкость и открывают возможности их использования в оборудовании вакуумных систем и установок электронного машиностроения и химических производств [3].

В настоящей работе рассмотрены структурные и триботехнические свойства вакуумных полимерных покрытий, получаемых из активной газовой фазы, модифицирующих рабочую поверхность резинотехнических уплотнителей трибосопряжений. Установлено, что триботехнические характеристики узлов трения достигают наибольшего значения при модификации резин композиционными покрытиями содержащими компоненты политетрафторэтилена и полиуретана.

Образцы и методика эксперимента

Получение полимерных пленок. Осаждение полимерных пленок на рабочую поверхность РТИ (модифицирование) осуществлялось методом вакуумного нанесения полимера на подложку из активной газовой фазы, образованной при электронно-лучевом диспергировании исходного полимера (Рис. 1) по известной технологии. Для обеспечения высокой адгезии рабочая поверхность РТИ подвергалась УЗ - очистке с последующей обработкой в плазме тлеющего разряда. Модификация рабочей поверхности РТИ осуществляется путем осаждения из активной газовой фазы продуктов электронно-лучевого диспергирования мишени из блочного политетрафторэтилена (ПТФЭ) или порошка ПТФЭ и полиуретана (ПУ) в вакуумной камере при начальном давлении $P = 10^{-2} - 10^{-3}$ Па.

Вследствие диспергирования исходных блочных полимеров в вакуумной камере образуется активная газовая среда молекулярных фрагментов распыляемого полимера. Летучие продукты активной газовой среды низкого давления проникают в пористый поверхностный слой РТИ и вторично полимеризуются в виде вакуумного покрытия (антифрикционный защитный слой). Для придания получаемому покрытию высокой адгезии и

сплошности в процессе его осаждения проводится технологическая обработка плазмой разряда исходной поверхности РТИ и полимерного слоя в процессе его роста.

В качестве источника электронов использовали электронно-лучевой прожектор с

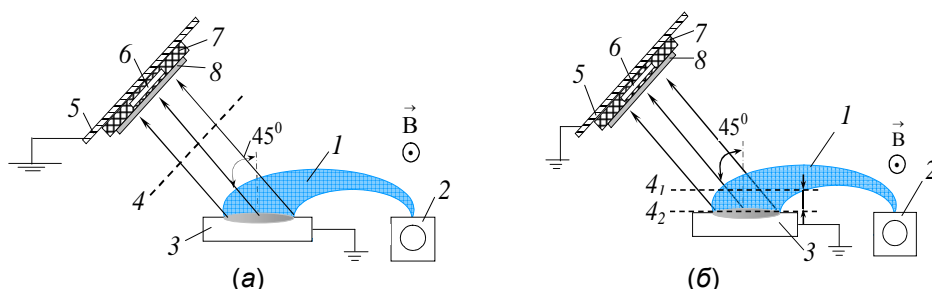


Рис. 1. Схема устройства для модифицирования резин в 2-х вариантах (а) и (б): 1 – электронный луч; 2 – электронно-лучевой испаритель; 3 – тигель; 4 и 4₁-4₂ – сетчатые электроды; 5 – держатель; 6 – кварцевый измеритель толщины; 7 – резиновое изделие; 8 – осаждаемое полимерное покрытие.

катодом прямого накала, позволяющий формировать пучки с плотностью тока $j = 50 \div 500 \text{ A/ м}^2$, энергией частиц $E = 0,1 \div 2,5 \text{ кэВ}$ и площадью пятна $S = (1 \div 5) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Расстояние «тигель – подложка» составляет $\sim 20 \text{ см}$.

Особенностью модифицирования резин по схеме рис. 1 (а) и (б) являлась плазменная активация летучих продуктов диспергирования в процессе формирования полимерного слоя путем создания плазменного разряда на переменном токе между сетчатый-электродом 4 и подложкой или электродами в области источника газовой фазы 4-4₁. Активационную обработку поверхности резин перед нанесением покрытий осуществляли либо пучком ионов азота, либо в плазме тлеющего разряда.

Скорость нанесения покрытия из ПТФЭ составляет $\sim 8,0 \text{ нм/с}$, а из ПУ $\sim 6-10 \text{ нм/с}$. Затем образец с покрытием термически обрабатывается на воздухе при $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 часов. Толщина полимерного покрытия на РТИ составляет $\sim 1,5-2,0 \text{ мкм}$. Равномерность покрытия по толщине достигается за счет перемещения РТИ планетарным механизмом в вакуумной камере.

Исходные уплотнительные РТИ выполняются на основе каучуков: бутадиеннитрильного (маслобензостойкая резина № 3826), силоксанового (5И-23) и фторкаучука (типа ИРП-1287).

В Табл. 1 представлены основные типы образцов модифицирующих полимерных покрытий на поверхности РТИ и последовательность диспергирования исходных полимерных компонентов.

Таблица 1

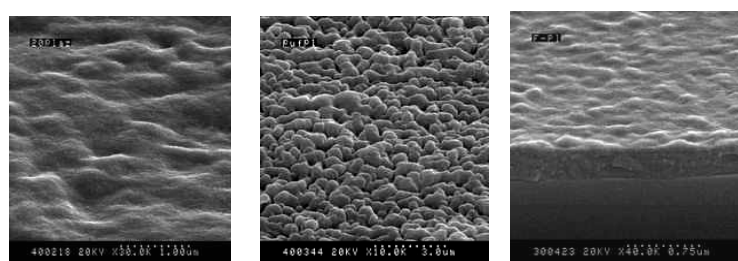
Типы полимерных покрытий модифицирующих РТИ и режимы их нанесения

Тип образца	Толщина покрытия, мкм	Состав покрытия и его характер	Режим диспергирования исходного полимера
1	0,8-1,2	монослой ПТФЭ	блочный ПТФЭ
2	1,2-1,6	композит ПТФЭ+ПУ при соотношении компонентов 1:1	смесь порошков ПТФЭ+ПУ
3	1,2-1,6	композит ПТФЭ+ПУ при соотношении компонентов 2:1	смесь порошков ПУ+ПТФЭ, затем порошок ПТФЭ
4	1,4-1,8	двухслойный композит ПТФЭ+ПУ	порошок ПУ, затем порошок ПТФЭ

Триботехнические исследования модифицированных РТИ проводились по оценке экспрессным методом в модели трибосопряжения, представленного при нормальных условиях, согласно широко распространенной схеме вал - частичный вкладыш как без смазки в режиме сухого трения, так и со смазкой окунанием, т.е. на стендах, имитирующих реальные узлы трения. Частичный вкладыш представлял собой 1/6 часть кольца, имеющего внутренний диаметр 40 мм, внешний - 60 мм и толщину 10 мм. Вал изготавливался из сталей 40X (ГОСТ 4543-71) и ШХ-15 (ГОСТ 801-78). Он имел внешний диаметр 40 мм, толщину 10 - 12 мм и посадочное отверстие диаметром 16 мм. Твердость стального вала составляла 51... 55 HRC. Подача масляного смазочного материала к поверхности трения осуществлялась путем окунания стального вала. В качестве смазочного материала применялись масла: компрессорное КС-19 (ГОСТ 20799-75), дизельное М14Б (ТУ 38-101-264-72), промышленное И-20А (ГОСТ 20799-75). Испытания проводились также в среде дизельного топлива Л-68 (ГОСТ 305-82).

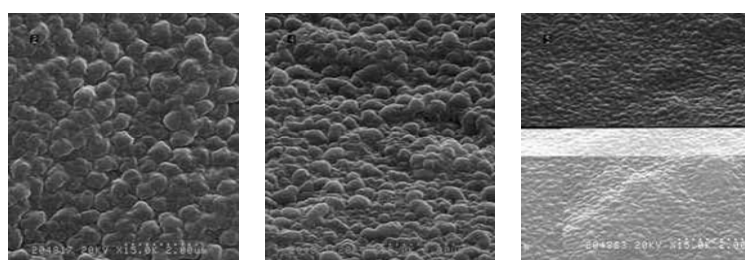
Результаты эксперимента и их обсуждение

Структура вакуумных покрытий. Покрытия ПТФЭ, полученные на поверхности РТИ в условиях плазменной активации продуктов диспергирования согласно Рис. 2 (а), характеризуются отсутствием в молекулярной структуре двойных ненасыщенных связей и более низкой степенью кристалличности. С увеличением плотности



(а) (б) (в)

Рис. 2. Морфология поверхности композиционных полимерных покрытий ПУ+ПТФЭ (1:1) на РТИ, полученных при различных режимах распыления исходных полимеров. Плотность тока электронного луча : а - 2,5 А/м²; б - 4 А/м²; в - 7.5 А/м².



(а) (б) (в)

Рис. 3. Морфология комбинированных покрытий ПУ – ПТФЭ: а, б, в – соотношение ПУ и ПТФЭ в исходной смеси соответственно 2:1, 1:1, 1:2.

тока разряда наблюдается монотонное снижение кристалличности осаждаемых покрытий и образования столбчатых структур с мелкими сферическими элементами размером менее 0,1 мкм (Рис. 2).

На Рис. 3 представлены результаты исследований морфологии пленочных покрытий ПУ–ПТФЭ, сформированных из активной газовой фазы при диспергировании смеси порошков полимеров ПУ и ПТФЭ с различным массовым соотношением компонентов. Анализ поверхностей модельных образцов модифицированных резин типа СКН-26 на растровом электронном микроскопе (РЭМ изображений) показывает явную зависимость структурных свойств получаемых пленочных покрытий в зависимости от технологических режимов диспергирования ПУ и ПТФЭ при их осаждении. Результаты исследований модифицированной поверхности РТИ при интенсивном электронно-лучевом диспергировании ПУ показывают, что интенсивные взаимодействия низкомолекулярных фрагментов макромолекул между собой являются ответственными за образование микрокапельной фазы в структуре покрытия (Рис. 3 и Рис. 4). Так при диспергировании смеси порошков полимеров политетрафторэтилена и полиуретана продукты электронно-лучевого диспергирования ПТФЭ препятствуют слиянию капелек ПУ в крупные вто-

ричные образования, как в газовой фазе, так и непосредственно на поверхности резины-подложке. С увеличением доли ПТФЭ в исходной смеси удается получать покрытия с меньшим размером сферических образований (Рис. 3 в).

Микроскопические исследования комбинированных полимерных покрытий показали, что электронно-лучевое диспергирование смеси порошков полимеров ПТФЭ и ПУ в вакууме приводит к формированию покрытий, представляющих собой матрицу из ПТФЭ с распределенными внутри микрокаплями ПУ.

При этом ИК - спектры композиционного покрытия ПУ – ПТФЭ имеет полосы поглощения характерные для однокомпонентных покрытий ПУ и ПТФЭ (Рис. 4). В зависимости от интенсивности обработки электронами газовой среды в ИК - спектре пленочных покрытий наблюдаются существенные изменения в структуре полимера в области образования поперечных двойных связей и оксидных групп при $\sim 1680-1750 \text{ см}^{-1}$ (кривые 2 и 3, Рис. 4). Однако в ИК-спектрах полимерных покрытий не наблюдается полосы поглощения в области 1250 см^{-1} , ответственной за колебания углеводородных фрагментов для композиционного покрытия, обусловлен-

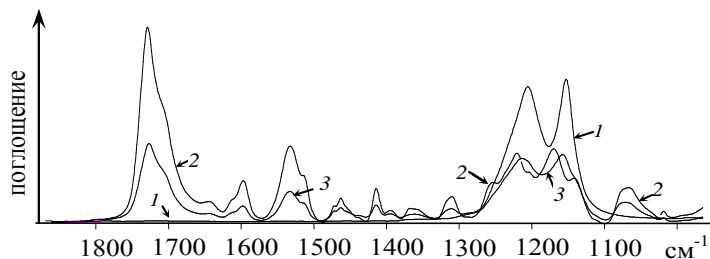


Рис. 4. ИК - спектры полимерных покрытий: 1 – слой ПТФЭ; 2 – слой ПУ; 3 – композиционная пленка ПУ-ПТФЭ.

ных покрытий наблюдаются существенные изменения в структуре полимера в области образования поперечных двойных связей и оксидных групп при $\sim 1680-1750 \text{ см}^{-1}$ (кривые 2 и 3, Рис. 4). Однако в ИК-спектрах полимерных покрытий не наблюдается полосы поглощения в области 1250 см^{-1} , ответственной за колебания углеводородных фрагментов для композиционного покрытия, обусловлен-

ной результатом протекания химических реакций между углеводородными и фторсодержащими углеродными фрагментами ПЭЛД ПУ и ПТФЭ. Одним из результатов данной реакции является образование фторводорода в процессе отрыва атомов водорода от углеродной цепочки. Химические реакции между ПЭЛД исходных порошков, как в газовой фазе, так и в тигле, по-видимому, не приводят к возникновению связей между фрагментами макромолекул различной природы. Структура композиционных покрытий ПУ–ПТФЭ содержат квазисферические образования ПУ, размер которых уменьшается с увеличением доли ПТФЭ в исходной смеси порошков, а композиционные слои ПТФЭ–ПУ представляют собой высокодисперсные бинарные механические смеси модифицированных компонент. Такие композиционные покрытия можно рассматривать как дисперсную механическую смесь плазменно модифицированных фторопластового и полиуретанового компонентов.

При сухом трении РТИ, модифицированных полимерными покрытиями в виде пленок композиционных структур ПУ–ПТФЭ, наблюдается существенное снижение их коэффициента трения $f_{тр}$ при определенных режимах истирания образцов. Результаты экспериментальных исследований представлены на Рис. 5 и Рис. 6 и в Табл. 2 и Табл. 3.

На Рис. 5 представлены графики зависимости коэффициента трения $f_{тр}$ покрытий

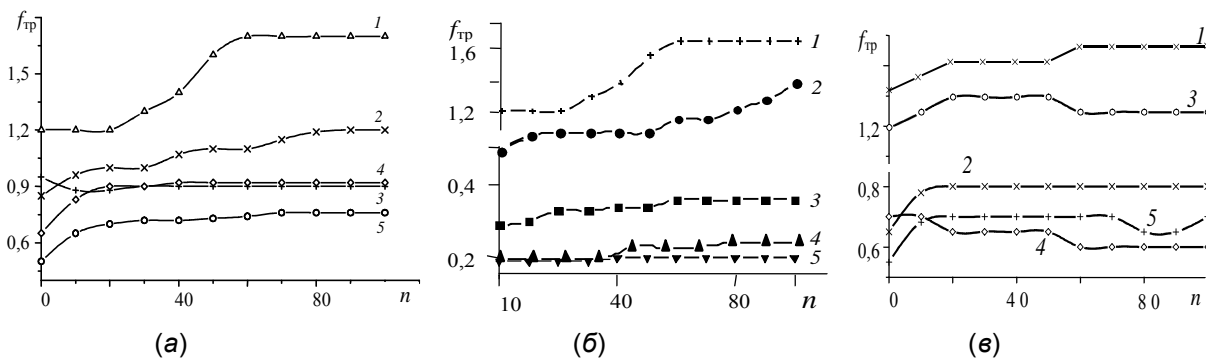


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения $f_{тр}$ покрытий РТИ от числа циклов истирания n вдоль оси деформации резины при скорости трения $v = 4-42 \text{ м/с}$ и нагрузке по нормали к поверхности трения $N = 0,2 \text{ Н}$. Образцы РТИ: (а) – двухслойным покрытием ПУ + ПТФЭ; (б) – из СКН-26 предварительно обработанного в плазме разряда и нанесенным покрытием ПТФЭ; (в) – с поверхностью обработанной ионами азота и нанесением покрытия ПТФЭ.

РТИ от числа циклов истирания n вдоль оси деформации резины при скорости трения $v = 4-42$ м/с и нагрузке по нормали к поверхности трения $N = 0,2$ Н. Кривые обозначены для образцов:

(а) 1 – исходная резина; 2 – резина с двухслойным покрытием ПУ (0,25 мкм) + ПТФЭ с толщиной каждого слоя по $\sim 0,25$ мкм; 3 – резина с композиционным покрытием ПУ-ПТФЭ (1:1); 4 – ПУ-ПТФЭ (1:2); 5 – ПУ-ПТФЭ (2:1).

(б) поверхность РТИ из СКН-26 обработана в плазме при токе разряда ~ 20 мА образцов: 1 – без полимерного покрытия; 2 – с вакуумным покрытием из ПТФЭ; 3 – деформированная резина + покрытие ПТФЭ; 4 – обработанная в плазме резина + покрытие ПТФЭ; 5 – деформированная, обработанная в плазме резина + покрытие ПТФЭ.

(в) поверхность РТИ обработана ионами азота в течение $t = 78$ с: 1 – исходной резины; 2 – обработанная ионами азота; 3 – резина растянута и обработана ионами азота; 4 – обработана ионами азота с последующим нанесенным покрытием ПТФЭ; 5 – растянутая резина обработана ионами азота и нанесено покрытие ПТФЭ.

Из результатов исследований, согласно графикам Рис. 5, а-в, видно, что модифицированная поверхность РТИ существенно снижает коэффициент трения $f_{тр}$ по стали.

На Рис. 6 представлены снимки РЭМ - изображений поверхности РТИ на основе резин СКН-26, модифицированных покрытиями ПУ-ПТФЭ (1:1) толщиной 0,5 мкм после ряда циклов истирания. Здесь: а – исходное покрытие; б – 300; в – 1000; г – 5000. Параметры узла трения для (а, б, в) $N = 0,2$ Н; $v = 4,4 \cdot 10^{-2}$ см/с; $d_{инд} = 4$ мм, а для (г) - $N = 0,4$ Н и $v = 3,41$ см/с.

Результаты испытаний поверхности трения пар РТИ - сталь с модифицирующим комбинированным покрытием ПУ-ПТФЭ (1:1) (Рис. 6) показали, что в результате протекания процесса трения в морфология покрытий претерпевает существенные изменения. Под действием индентора происходит сглаживание покрытия за счет пластического деформирования полиуретановых образований и заполнения неровностей покрытия фторопластом. В зоне трения формируется, структура, представляющая полиуретано-

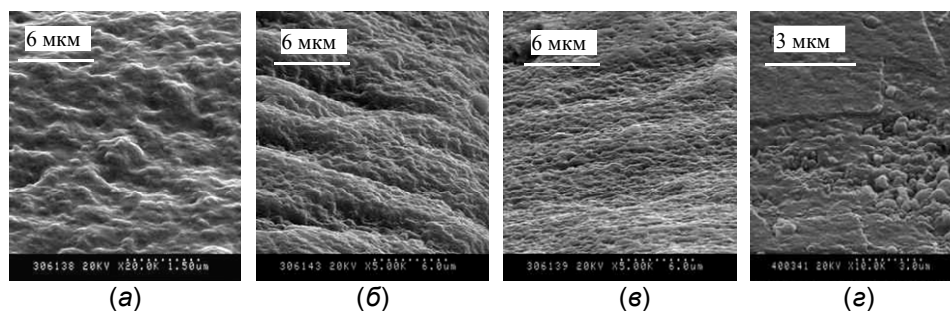


Рис. 6. Снимки РЭМ-изображений поверхности РТИ на основе резин СКН-26, модифицированных покрытиями ПУ-ПТФЭ (1:1) толщиной 0,5 мкм после ряда циклов истирания n : а – исходное покрытие; б – 300; в – 1000; г – 5000. Параметры узла трения для (а, б, в): $N = 0,2$ Н; $v = 4,4 \cdot 10^{-2}$ см/с; $d_{инд} = 4$ мм, а для (г) - $N = 0,4$ Н и $v = 3,41$ см/с.

вую матрицу с распределенными внутри нее частицами фторопласта. Полиуретановая матрица препятствует выносу ПТФЭ из зоны трения. Исследуемые РТИ, модифицированные комбинированными покрытиями ПУ – ПТФЭ (1:1), характеризуются низким значением коэффициента трения на истирание даже при высоком значении поверхностной энергии ($15,98$ мДж/м²) и высокой износостойкостью нанесенного покрытия. После 10^3 циклов истирания продукты изнашивания поверхностного слоя резины практически отсутствуют.

Увеличение скорости истирания поверхности РТИ, модифицированного покрытием ПУ – ПТФЭ (1:1), приводит к росту значений коэффициентов трения $f_{тр} = 0,9$ после 100 циклов при скорости $v = 3 \cdot 10^{-3}$ м/с и нагрузке по нормали $N = 0,2$ Н. В зоне трения, также как и при малых скоростях истирания, покрытие интенсивно деформируется. Высокое значение коэффициента трения обусловлено, по-видимому, тем, что при высоких скоростях истирания слой ПТФЭ, играющий роль твердой смазки, удаляется с высоко-

нагруженных участков покрытия. В результате в зоне истирания осуществляется взаимодействие между полиуретановой матрицей и металлическим индентором. Дальнейшее увеличение скорости истирания до $\sim 3,41 \cdot 10^{-2}$ м/с интенсифицирует процессы растрескивания покрытия под действием циклических нагрузок.

Таблица 2

Временная зависимость коэффициента сухого трения исходных и модифицированных образцов РТИ в трибосопряжении

№	РТИ на основе	Коэффициент трения за время работы					
		0,3 кс		0,5 кс		1,5 кс	
		исх.	модиф.	исх.	модиф.	исх.	модиф.
1	Бутадиеннитрильный каучук	0,75	0,30	0,70	0,32	0,65	0,35
2	фторкаучук	0,50	0,30	0,40	0,28	0,38	0,27

Таблица 3

Изменение силы трения резинометаллических пар трения с РТИ

Образец РТИ	Поверхность образца	Сила сухого трения (на воздухе), мН			
Вид каучука	РТИ	Начальный момент, скорость скольжения, м/с		После 100 циклов, скорость скольжения, м/с	
		0,04	0,08	0,04	0,08
Фторкаучук	без покрытия	1,2	1,45	КС***	
Фторкаучук	с покрытием*	0,35	0,35	0,35	0,35
Бутадиеннитрильный	без покрытия	1,55	2,5	КС***	
Бутадиеннитрильный	с покрытием*	0,35	0,4	0,35	0,4
Силоксановый	без покрытия	0,6	0,7	КС***	
Силоксановый	с покрытием*	0,16	0,18	0,28**	0,38**

* После обработки поверхности в тлеющем разряде и последующем нанесении однослойного фторполимерного покрытия.

** Измерения проводились после 300 циклов испытаний.

*** КС - катастрофический износ.

Методами РЭМ-микроскопии удалось установить, что при трении пленки в трибосопряжении возникает процесс усталостного растрескивания тонкого поверхностного слоя покрытия, который в дальнейшем подвергается интенсивному дроблению износа из-за низкой когезионной прочности. На снимках поверхности трения Рис. 6,з, отчетливо видны сферические продукты износа покрытия, являющиеся структурными элементами комбинированного ПУ–ПТФЭ покрытия из-за его пониженной когезионной прочности. Наиболее стабильными триботехническими свойствами обладают РТИ, модифицированные покрытиями ПУ–ПТФЭ в равном массовом соотношении компонент (1:1), которые обеспечивают снижение коэффициента трения $> 1,5$ раз, на момент образования на металлическом ролике узла трения пленки переноса, состоящей из покрытия и продуктов изнашивания резины РТИ. Наличие в зоне трения пленки переноса препятствует непосредственному взаимодействию между металлическим роликом и резиновым вкладышем. Механизм разрушения резин в результате образования «скаток» уступает место усталостному механизму разрушения.

В процессе испытаний пар трения РТИ - сталь также определялись эксплуатационные свойства покрытий во времени при их работе (скорость скольжения и коэффициент трения резинометаллических пар). Результаты эксперимента представлены в Табл. 2-3, из которых видно, что многослойные покрытия значительно снижают момент трения и износ резинометаллической пары при уменьшении значений поверхностной

энергии резин с покрытием из ПТФЭ (тип 1) в 6-7 раз. У комбинированных композиционных покрытий также наблюдается снижение поверхностной энергии. Так у композиционного покрытия из смеси ПТФЭ+ПУ (тип 2, Табл. 1) она снижается практически в два раза, а у покрытия, полученного из смеси порошков ПТФЭ+ПУ при соотношении компонентов 2:1 и поверхностным слоем ПТФЭ снижается (тип 3, Табл. 1) в 8-9 раз.

Однослойное покрытие ПТФЭ, благодаря своим триботехническим свойствам (низкого коэффициента трения при послойном износе) существенно снижает коэффициент трения пары. Однако, без ПУ данное покрытие недолговечно, поскольку оно очень быстро уходит «вымывается» из зоны трения благодаря своей природе, о чем свидетельствует значительный износ покрытия (тип 1, Табл. 1). Полиуретан, напротив, не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на износ. При нанесении комбинированного покрытия ПУ+ПТФЭ, молекулы этих полимеров диффундируют в поверхностные слои РТИ и образуют комбинированную пленку.

Трение резин в масляной среде. Полимерный слой, защищая эластомер от контакта со смазкой, за счет высокой поверхностной энергии препятствует выносу углеродного покрытия из зоны трения.

Исследование размера величин частиц износа исходных и модифицированных РТИ при трении со сталью показали, что модифицированное РТИ (тип 2) имеет больше мелких (< 2 мкм) частиц износа (~ 40 % от общего числа частиц износа) по сравнению с исходным РТИ (~ 31 %). Поскольку мелких частиц износа у трибосопряжения с модифицированным РТИ больше, то подтверждается гипотеза об смене основного механизма изнашивания резин в процессе трения «скатыванием» на механизм усталостного износа, что позволяет существенно снизить потери на трение. Нанесение фторполимерных покрытий принципиально изменяет механизм изнашивания резинометаллической трибосистемы, т. е. поверхность РТИ вместо изнашивания «скатыванием» проявляет механизм усталостного износа, который значительно повышает ресурс трибосопряжений.

Поскольку на практике для работы в масляной жидкой среде (например, дизельного топлива) в качестве материала уплотнений используются РТИ на основе бутадиеннитрильного каучука, как наиболее стойкого материала, то дальнейшие исследования нами проводились на РТИ этого исходного материала.

Известно [4,5], что при эксплуатации РТИ в смазке приводит к изменению характера смачивания контактирующих поверхностей – из зоны трения выдавливается часть смазочной жидкости, и работа такой пары трения проходит в режиме близком к граничной смазке.

Установлено, что при трении модифицированного РТИ о сталь в режиме граничной смазки, полимерное покрытие активно сопротивляется разрушению поверхности резины и самого покрытия, как бы упрочняя ее. Об этом свидетельствует более высокий коэффициент трения и более высокий износ у исходных РТИ и РТИ с однослойным полимерным покрытием (Табл. 4) по сравнению с многослойными комбинированными покрытиями ПУ+ПТФЭ [6].

Двухслойное покрытие ПУ+ПТФЭ (тип 4, Табл. 4), слой ПУ находится вне зоны контакта со сталью, вследствие чего модифицирующее покрытие активно изнашивается, чем пара с композиционным покрытием из смеси ПУ+ПТФЭ (тип 3, Табл. 4). Однако слоистое комбинированное покрытие (слой ПУ+ПТФЭ и слой ПТФЭ) как и композиционное покрытие ПУ+ПТФЭ (тип 2, Табл. 4) активно сопротивляется изнашиванию по сравнению с двухслойным покрытием ПУ+ПТФЭ (тип 4, Табл. 4). Можно предположить, что структура ПУ в покрытии создает достаточно прочный каркас, в котором удерживаются микрочастицы ПТФЭ.

В любом случае, при нанесении покрытия на поверхность РТИ, последние значительно медленнее разрушаются под действием агрессивных сред и сил трения. Об этом свидетельствует уменьшение амплитуд циклов изменения линейных размеров трибосопряжений. Как видно из Табл. 4, нанесение покрытий на поверхность РТИ в несколько раз снижает амплитуды циклов изменения линейных размеров, что снижает износ трибосопряжений, поскольку проявляется однозначная связь износа поверхностного слоя РТИ со средней величиной циклов изменения его линейных размеров.

Триботехнические характеристики РТИ на основе бутадиеннитрильного каучука с модифицированной поверхностью при трении по стали

№ п/п	Параметр образца РТИ	Тип образца с покрытием согласно Табл. 1				
		исходный	1	2	3	4
1	Поверхностная энергия, Дж/м ²	44	6,7	24	5,2	11
2	Износ, мкм (при $t = 7,2$ кс)	61	50,2	29,5	27,8	37,2
3	Момент трения пары, Н/м	0,66	0,58	0,43	0,33	0,30
4	Амплитуда изменения линейных размеров, мкм	6,0	4,4	1,4	-	3,5
5	Время достижения момента трения пары, кс	-	1,05	3,24	3,6	1,45
6	Изменение линейных размеров, мкм	2,05	9,4	6,0	8,0	8,0
7	Коэффициент трения при скорости 0,5 – 1,5 м/с	0,7 – 0,65	0,32 – 0,35	-	-	-

Из Табл. 4 видно, что модифицированные РТИ с покрытиями ПУ+ПТФЭ (тип 2) и (ПУ+ПТФЭ) + ПТФЭ (тип 3) обладают наиболее высоким ресурсом при работе в трибосопряжениях. Эти результаты согласуются с известными данными по долговечности пар трения трибосопряжений с покрытиями из полиуретана и политетрафторэтилена.

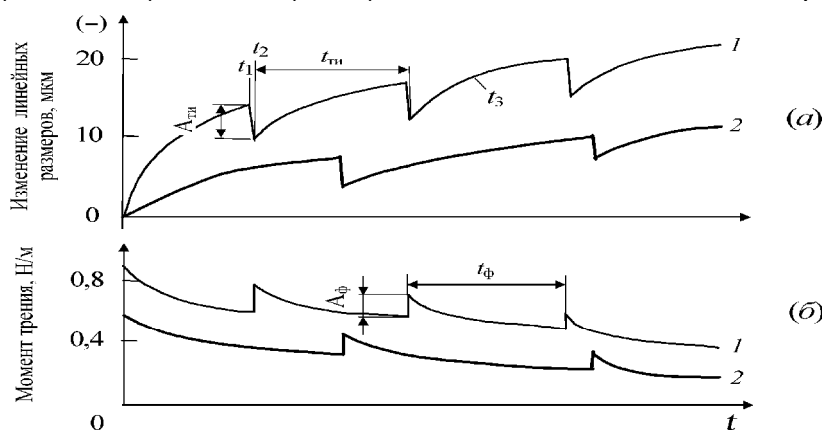


Рис. 7. График динамики изменения триботехнических параметров резинометаллических сопряжений, работающих в среде топлива. Кривые для пары трения РТИ - сталь для рабочей поверхности РТИ: 1 – исходной, без покрытия; 2 – с покрытием.

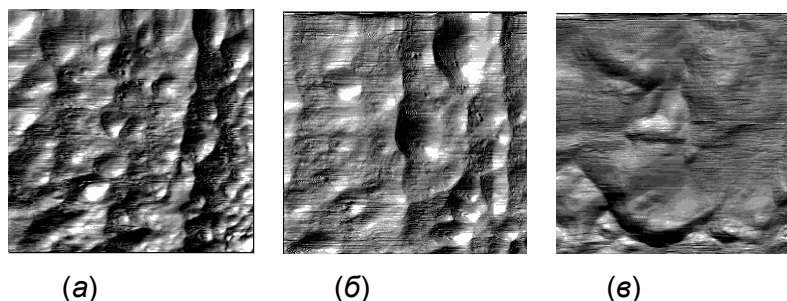


Рис. 8. Снимки АСМ поверхности РТИ при трении о сталь в масляной среде при времени t_2 (а, б) и t_1 (в) согласно рис. 7. Поле сканирования 200 мкм.

изменения момента трения и линейных размеров (Рис. 7). В определенный момент времени за $t_1 t_2 = 1 \div 2$ секунды происходит резкое увеличение линейного размера пары и

момента трения (t_1). Затем значения триботехнических характеристик постепенно уменьшаются (t_3) и система переходит в квазистационарный режим работы (t_2). Данные изменения неоднократно повторяются в процессе работы пары. Однако при трении резинометаллических пар в режиме сухого трения (без смазки) такие процессы не наблюдаются.

Предположение о периодическом разрушении поверхности резины в процессе трения хорошо иллюстрируют снимки поверхности трения в характерных точках (t_{1-3} , Рис. 7), снятые на атомно-силовом микроскопе, которые представлены на (Рис. 8) [6]. Из Рис. 7 и 8 видно, что в момент резкого изменения триботехнических характеристик происходит заметное изменение морфологии поверхности трения резины. Резкое возрастание коэффициента трения $f_{тр}$ значительно увеличивает плотность выступов на поверхности образца РТИ, поскольку образуется поверхность с большой шероховатостью, которая свидетельствует о разрушении поверхности приповерхностных слоев РТИ при её трении. Размеры выступов на поверхности образца во время скачкообразного изменения триботехнических характеристик составляют порядка $\sim 700-800$ нм. При этом на стадии квазистационарного трения (в момент времени t_1) поверхность трения резины достаточно ровная, без большого числа мелких выступов.

Основными параметрами наблюдаемых циклических изменений являются: амплитуды изменений линейных размеров $A_{ти}$ и момента трения $A_{ф}$, продолжительность циклов $t_{ти}$ и $t_{ф}$, а также уменьшение линейного размера (износ) пары за один цикл работы (рис. 7) [6].

Таким образом, изменение адсорбционных свойств поверхности РТИ, в результате поверхностной модификации полимерными покрытиями, является основной причиной изменения линейного размера РТИ.

Поскольку основным механизмом разрушения резин, работающих в среде смазки по гладкой металлической поверхности является усталостный износ, в результате которого в зоне трения образуются “скатки”, то из-за изменения энергии поверхности РТИ, путем нанесения однослойных или композиционных многослойных покрытий с компонентой ПТФЭ, существенно изменяется характер трения и изнашивания резинометаллических пар трибосопряжений.

Имеющиеся в машинах и приборах разновидности форм (Рис. 9) резинотехнических изделий для трибосопряжений с сложным рельефом рабочей поверхности для ра-

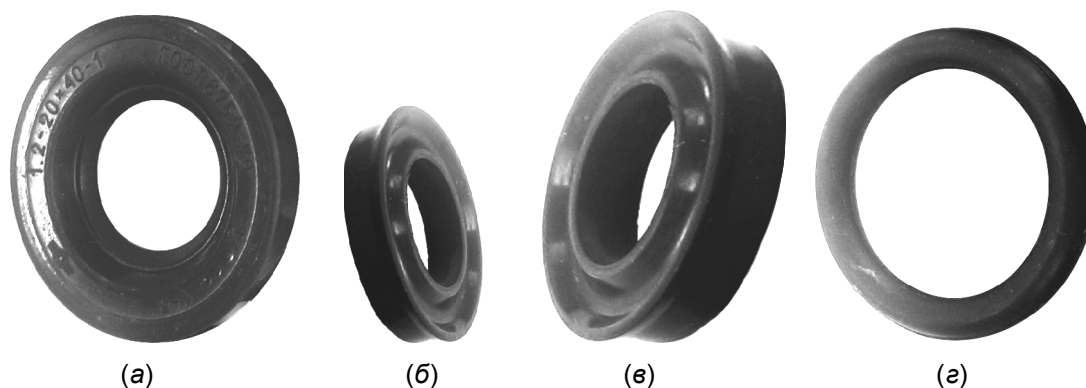


Рис. 9. Внешний вид конструкции резинотехнических уплотнительных изделий кольцевой формы с рабочей поверхностью: (а) - внутренней; (б) и (в) - внутренне-внешней поверхностями; (г) - внешней образца круглого сечения.

боты в экстремальных условиях в контакте с горюче-смазочными материалами, ставит технологическую задачу обеспечения высокой равномерности нанесения модифицирующего полимерного покрытия на все неоднородные участки РТИ. В этом случае использование технологических операций плазменной обработки полимерного слоя в процессе его роста позволяет формировать модифицирующие поверхности РТИ высокого качества.

Выводы

Путем нанесения однослойных или композиционных покрытий с компонентой ПТФЭ на рабочую поверхность РТИ, существенно изменяется её энергия поверхности, что приводит к существенному снижению её коэффициента трения.

Основным механизмом снижения изнашивания полимерных покрытий на резине в трибосопряжениях является уменьшение среднего размера частиц износа как следствие перехода механизма “скатывания” частиц полимер, наблюдаемому у исходных резин, к механизму усталостного износа резин с полимерным покрытием, что значительно повышает ресурс узла трения.

Установлено, что основной причиной изменения линейного размера РТИ в трибосистеме является изменение адсорбционных параметров резин в результате модификации рабочей поверхности полимерными покрытиями.

Обработка поверхности РТИ в среде полимеризующихся газов формируется износостойкая композиционная защитная пленка из фторполимера, которая может снижать её коэффициента трения в 1,5-2 раза, а набухание резины в среде топлив и масел в 2-5 раза при увеличении долговечности в 2-5 раза.

Введение в состав исследуемой трибосистемы тонкослойного, композиционного полимерного покрытия по своему характеру оказывает действие, аналогичное уменьшению величины нагрузки, прикладываемой к испытываемому трибосопряжению, что позволяет значительно повысить его ресурс как узла трения.

Работа выполнена при поддержке гранта целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы)”, подраздел: № 2.1.2 и грантов РФФИ:07-02-13661- офи_ц и 07-02-12259-офи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рогачев А.В., Буй М.В., Рельевская Г.В.* // Повышение ресурса узлов трения, работающих в экстремальных условиях. - М.: МФТИ, 1985, с. 126.
2. *Казаченко В.П., Лучников А.П., Рогачев А.В., Сидорский С.С.* Модификация резиновых уплотнений для подвижных элементов оптических приборов. // Тепловидение, № 13, 2000, с. 14-18.
3. *Рогачев А.В., Казаченко В.П., Щебров А. В. и др.* Использование плазмохимических процессов для повышения долговечности резинотехнических элементов гидросистем машин. // Современные проблемы машиноведения. / Материалы международной НТК, - Гомель. 1998, с. 138 -140.
4. *Бухина М.Ф.* Техническая физика эластомеров. – М.: Химия, 1984. – 224 с.
5. *Крылова С.Н., Уральский М.Л., Горелик Р.А. и др.* Антифрикционные свойства модифицированных резин. // Трение и износ, 1986, т. 7, № 3, с. 542-545.
6. *Петров В.С.* / Автореферат канд. техн. нук. - Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2002. - 21 с.