

УДК 639.62:678.01

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ТРЕНИЯ

С. В. ПЕТРОВ^а, А. В. РОГАЧЕВ^{а+}, А. В. ЩЕБРОВ^а, В. Л. ПОТЕХА^б

Показано, что основной причиной периодических изменений линейных размеров резинометаллических пар трения является изменение адсорбционных свойств поверхности в процессе контактного взаимодействия. Нанесение на поверхность трения покрытия в активной газовой фазе позволяет стабилизировать работу узла, снизить износ, силу трения.

Ключевые слова: поверхностная модификация, линейный размер системы, тепловое расширение, полимерное покрытие, резина, трение, износ.

Введение. Одной из характерных особенностей трения является периодическое изменение его параметров (коэффициента трения [1], интенсивности изнашивания [2], работы выхода электронов [3], а также структуры и состава смазочной среды [4] и др.) при определенных условиях и режимах контактного взаимодействия. В работе [5] установлены взаимосогласованные периодические изменения момента трения и линейных размеров пары трения сталь—резина, работающей в среде дизельного топлива. Изучение данного эффекта представляет не только научный, но и практический интерес в связи с решением проблемы повышения долговечности резиновых уплотнений, определения оптимальных режимов и условий их эксплуатации. Кроме этого на основании полученных данных возможна разработка рекомендаций по совершенствованию технологических методов повышения эксплуатационных свойств резинотехнических изделий.

Основной целью настоящей работы является определение характера влияния поверхностной модификации резины на триботехнические характеристики пары и установление наиболее вероятных причин периодических изменений линейного размера резинометаллических трибосопряжений.

Методика исследования. Объектом исследования являлись сопряжения типа вал—вкладыш. В качестве образцов использовались ролики, изготовленные из стали ШХ-15 (ГОСТ 801—78), имеющие внешний диаметр 40 мм, толщину ≈ 12 мм и посадочное отверстие диаметром 16 мм. Частичный вкладыш представлял собой 1/6 часть кольца с внешним диаметром 60 мм и толщиной 10 мм. Кольца изготавливались из маслостойкой резины 3826 на основе искусственных каучуков. Поверхностная модификация резин проводилась путем нанесения покрытия на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) и полиуретана (ПУ) в активной газовой фазе [6]. Основные параметры модификации приведены в табл. 1. Все пары трения имели установившуюся при данных режимах испытаний шероховатость.

Триботехнические испытания проводились на воздухе и в среде дизельного топлива Л-68 (ГОСТ 305—82) с использованием машины трения 2070 СМТ-1 (ПО “Точмаш”, Россия) в течение 3,6 кс, при нагрузке $p = 0,1$ МПа и скорости скольжения $v = 0,3$ м/с. В процессе эксперимента фиксировались следующие параметры: момент трения M , износ W , линейные размеры трибосопряже-

^а Белорусский государственный университет транспорта. Беларусь, 246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34.

^б Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Беларусь, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

+ Автор, с которым следует вести переписку.

Таблица 1. Режимы поверхностной модификации резин

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

ния Δ , амплитуда циклов периодических колебаний системы A и поверхностная энергия резинового вкладыша E .

Измерение линейных размеров Δ системы “вкладыш—ролик” за некоторый временной интервал эксплуатации проводилось с помощью прецизионного трибоанализатора PCLW-01 как разность $\Delta = l_t - l_0$ (l_t, l_0 — линейные размеры системы в момент трения t и через некоторое, достаточно продолжительное время, в течение которого узел трения не эксплуатировался, и происходило его охлаждение до комнатной температуры). Величина износа определялась по методике, приведенной в работе [5]. Для оценки поверхностного натяжения твердых тел использовался метод, заключающийся в измерении краевых углов смачивания исследуемой поверхности жидкостями одного гомологического ряда, для которых известны значения поверхностного натяжения [7]. Значения краевых углов смачивания определялись с помощью контактного углового гониометра.

Результаты работы и их обсуждение. Установлено, что нанесение на поверхность резинового вкладыша тонких полимерных покрытий заметно снижает его износ, особенно при трении о стальной ролик в среде дизельного топлива (табл. 2). При оптимальных режимах модификации (нанесение многослойного покрытия по режиму 4) износ вкладыша уменьшается по сравнению с исходным почти в два раза. При этом, как видно из табл. 2, значения износа коррелируют со значениями момента трения данного сопряжения, что согласуется с выводами работы [8] об определяющем влиянии процессов адгезионного взаимодействия на трение тонких полимерных покрытий.

Таблица 2. Триботехнические характеристики резинометаллических трибосопряжений

Резина	Износ W , мкм	Момент трения M , Н·м	Поверхностная энергия E , МДж/м ²	Амплитуда циклов A , мкм	Изменение линейных размеров Δ , мкм
Исходная	62	0,65	44,6	6,0	3,5
Модифицированная на режимах					
1	60	0,57	6,7	4,4	9,5
2	40	0,44	24,5	1,3	5,0
3	41	0,30	5,2	3,6	8,0
4	38	0,33	10,6	0	8,0

Отметим, что триботехнические испытания проводились достаточно длительное время, за которое износ модифицированных трибосопряжений имел величину порядка 30 мкм, что значительно превосходит эффективную толщину наносимого полимерного покрытия, которая составляет 1–2 мкм. В течение этого времени наблюдаются и низкие значения момента трения. Исходя из этого, можно предположить, что при поверхностной модификации в активной газовой фазе органические фрагменты макромолекулы полимера проникают на глубину более 30 мкм, адсорбируются в этом поверхностном слое и оказывают свое положительное действие на процесс трения. Полученные значения толщины модифицированного слоя согласуются с данными, приведенными

ми в работе [9] при оценке триботехнических свойств резин, модифицированных в высокочастотном глеющем разряде.

Установлено также, что состояние поверхностного слоя резины очень сильно влияет на значение амплитуд циклов изменения линейного размера Δ ; резинометаллические трибосопряжения, содержащие полимерные покрытия, имеют более высокие (в 2–3 раза) значения по сравнению с исходной парой. В общем случае изменение линейных размеров трибосистемы, эксплуатирующейся в смазочной среде, может быть вызвано тепловым расширением при нагреве поверхностных слоев при трении Δ_T , износом W , деформацией резинового вкладыша Δ_d и изменением толщины смазочного слоя Δ_c в зазоре “ролик–вкладыш”:

$$\Delta = \Delta_T - W + \Delta_d + \Delta_c. \quad (1)$$

Можно показать, что при относительно низких скоростях скольжения

$$\Delta_T = (T_n - T_0) [\alpha_1 d f_1(\varphi_1) + \alpha_2 d f_2(\varphi_2)]. \quad (2)$$

Разность температур $T_n - T_0$ можно определить из условия теплового баланса

$$\mu v \sigma = (T_n - T_0) (\varphi_1 \lambda_1 / d_1 + \varphi_2 \lambda_2 / d_2). \quad (3)$$

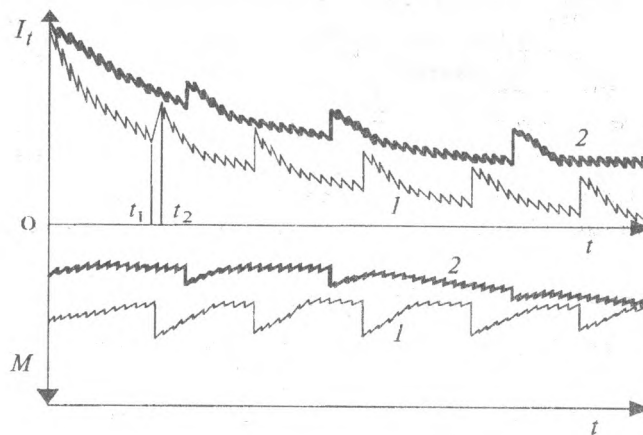
Учитывая соотношение (3), выражение (2) запишем в виде

$$\Delta_T = [\mu v \sigma / (\varphi_1 \lambda_1 d_2 + \varphi_2 \lambda_2 d_1)] d_1 d_2 [\alpha_1 d f_1(\varphi_1) + \alpha_2 d f_2(\varphi_2)]. \quad (4)$$

Анализ полученного выражения показывает, что величина теплового расширения имеет меньшее значение в случае трения с более низким коэффициентом. Следовательно при проведении поверхностной модификации резины параметр Δ_T в сравнении с исходной резиной имеет меньшее значение. Тогда при условии, что поверхностная модификация резин не сказывается на их деформационных свойствах [6], на основании результатов, представленных в табл. 2, можно сделать вывод об определяющем влиянии на изменение линейного размера трибосистемы изменений толщины смазочного слоя Δ_c в зазоре “ролик–вкладыш”. Правомочность данного положения подтверждается результатами измерения поверхностной энергии модифицированных резин (табл. 2). Видно, что увеличение E резин сопровождается снижением Δ .

Таким образом изменение адсорбционных свойств резин в результате поверхностной модификации является основной причиной изменения линейного размера трибосистемы. В узле трения, содержащем немодифицированный резиновый вкладыш, поверхностная энергия которого относительно велика, после его остановки и охлаждения удерживается более толстый слой смазочного материала и, как следствие этого, изменение линейного размера системы незначительно.

При трении в среде дизельного топлива, как уже отмечалось, проявляются периодические изменения момента трения и линейного размера l системы “вкладыш–ролик” в процессе трения, которые являются взаимосогласованными и достаточно слабо изменяющимися в процессе трения в пределах ресурса работы модифицированного слоя (рисунок). Характерной особенностью пред-



Характерные изменения линейного размера (а) и момента трения (б) модифицированных (1) и исходных (2) резин в процессе контактного взаимодействия

ставленных кинетических кривых является скачкообразное возрастание силы трения в момент повышения l . При трении на воздухе данный эффект менее выражен.

Полученные данные, свидетельствующие о существенном влиянии адсорбционной активности поверхности на линейные размеры системы, позволяют объяснить и механизм периодических изменений l в процессе трения (рисунок). Проведенные измерения значений поверхностной энергии, результаты которых представлены в табл. 3, указывают, что резкое увеличение коэффициента трения на участке t_1-t_2 (рисунок) сопровождается существенным повышением E , особенно ее полярной составляющей, что, в свою очередь, вызывает увеличение толщины смазочного слоя и соответственно линейного размера системы.

Таблица 3. Значения поверхностной энергии резиновых образцов, МДж/м²

Момент времени	Дисперсионная составляющая	Полярная составляющая	Поверхностная энергия
t_1	4,7	31,4	36,1
t_2	4,13	38,67	42,7

Примечание. $v = 0,5$ м/с, $p = 0,25$ МПа.

Изменение же поверхностной энергии обусловлено циклическим характером протекающих последовательно процессов накопления в поверхностном слое микродефектов, образования скаток, их отрыва от поверхности и выноса из зоны трения [10]. Именно на временном отрезке t_1-t_2 происходит отрыв скаток от поверхности и поэтому наблюдается резкое увеличение E и возрастание момента трения.

Нанесение полимерных покрытий на поверхность резины стабилизирует работу трибосистемы. Поверхностная модификация позволяет существенно снизить среднее значение амплитуды периодических изменений Δ (табл. 2). При оптимальных режимах обработки (нанесении комбинированных покрытий по режиму 4) периодические изменения амплитуды не наблюдаются, что объясняется изменением механизма изнашивания при трении (образование скаток не происходит).

Выводы. Показано, что резкие периодические изменения в процесс трения линейного размера резинометаллической пары, работающей в условиях жидкой смазки, обусловлены изменением адсорбционной активности поверхности трения. Модификация поверхности резины в активной газовой фазе значительно снижает износ, момент трения пары и обеспечивает ее более стабильную работу.

Обозначения

T_n — температура поверхности трения; T_0 — температура окружающей среды; 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 и условий теплообмена; μ — коэффициент трения; v — 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; A — амплитуда колебаний; W — износ резинового элемента; l , Δ — линейные размеры системы и их изменение; E — поверхностная энергия; p — давление.

Литература

1. Крагельский И. В., Щедров В. С. Развитие науки о трении. Сухое трение. М.: Изд-во АН СССР (1956)
2. Орлова Н. И., Шустер Л. Ш. Изнашивание шаржированным абразивом в процессе доводки // Трение и износ, 1 (1980), № 5, 939–942
3. Жарин А. Л., Генкин В. А. О периодичности работы выхода электрона трущейся поверхности // Трение и износ, 2 (1981), № 1, 118–124

4. Пинчук Р. Г., Плескачевский Ю. М. Исследование кинетики трения и изнашивания с применением методов радиоспектроскопии // Трение и износ, 9 (1986), № 5, 907—918
5. Потеха В. Л., Петров С. В. Гармонический анализ результатов трибологических испытаний резинометаллических трибосопряжений // Вести НАН Беларуси (1998), № 4, 78—83
6. Рогачев А. В., Казаченко В. П., Щебров А. В. и др. Использование плазмохимических процессов для повышения долговечности резинотехнических элементов гидросистем машин // Сб. "Современные проблемы машиностроения". Гомель, 1 (1998), 137—139
7. Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия (1976)
8. Рогачев А. В., Лучников А. П., Камильджанов Б. И. и др. Адгезионное взаимодействие при трении тонких пленок // Трение и износ, 7 (1988), № 5, 891—895
9. Крылова С. Н., Уральский М. Л., Горелик Р. А. и др. Антифрикционные свойства модифицированных резин // Трение и износ, 7 (1986), № 3, 542—545
10. Поляков П. В. Поверхностные изменения в резине при трении по металлу и температурно-временной метод их фиксации // Трение и износ, 7 (1986), № 3, 546—548

Поступила в редакцию 11.03.99.

Petrov S. V., Rogachev A.V., Schebrov A.V., Poteha V. L. Study of the mechanism of periodic modifications of linear sizes of rubber-metal triboconjunctions during friction.

It is shown that the main reason of periodic modifications of linear sizes of rubber-metal pairs of friction is the modification of adsorption properties of a surface during contact interaction. The plotting of a cover on a friction surface in an active gas phase allows to stabilize work of a knot and to reduce wear, and force of friction.