

УДК 621.891: 531.43

В. Л. ПОТЕХА, С. В. ПЕТРОВ

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОПРЯЖЕНИЙ

Введение. Скачкообразные изменения силы при испытании пар трения скольжения, по-видимому, впервые были экспериментально установлены еще в 30-х годах текущего столетия [1]. Несколько позднее скачкообразный характер изменения фрикционных характеристик был представлен в [2, 3]. Впоследствии фрикционные колебания были предметом многочисленных исследований [4, 5]. Также установлено скачкообразное изменение износа материалов в процессе их трибологических испытаний [6—9]. Считают, что экспериментально установленный циклический характер изнашивания материалов может быть обусловлен адгезионным взаимодействием контактирующих поверхностей [8], периодическим изменением интегрального значения работы выхода электрона трущейся поверхности [10] или поверхностной плотности дислокаций [11].

Проведенные исследования не смогли решить большое число проблем, связанных с погрешностью производимых измерений и сопоставимостью полученных в разных лабораториях результатов, отсутствием их ориентации на конкретные практические цели, пренебрежением возможного взаимного влияния износных и фрикционных процессов, недостаточным учетом роли тепловых процессов при трении (например, их влиянием на изменение размера трибосистем или их отдельных элементов, используемых для оценки износа) и др. На необходимость решения этих проблем указывается в работах [12—15].

Значительную часть этих проблем удалось решить, а для остальных определить оптимальные пути их разрешения благодаря созданию оригинальной конструкции трибодилатометра, а также реализуемых с его помощью методик измерений [16, 17] и определению нового направления в трибодиагностике — трибодилатометрии [18]. Дальнейший прогресс в развитии этого перспективного исследовательского направления во многом обуславливается эффективностью использования математических методов для описания закономерностей циклического изменения термоизносных и фрикционных характеристик испытываемых материалов.

Настоящая статья посвящена использованию метода гармонического анализа для описания циклических зависимостей изменения термоизносных и фрикционных характеристик исследуемых трибосопряжений металл—резина.

Методика исследования. Объектом исследования являлись резинометаллические сопряжения типа вал—вкладыш. Металлические валы были изготовлены из стали ШХ15. Диаметр валов 40 мм, ширина 12 мм. В экспериментах использовались валы с шероховатостью $Ra=0,093$ и $0,432$ мкм. Вкладыши изготавливались из бензомаслостойкой резины 3826 с площадью рабочей поверхности 2 см^2 и шероховатостью $Ra=0,576$ мкм. На рабочей поверхности вкладышей было сформировано

фторопластовое (ПТФЭ) покрытие толщиной 0,15—0,20 мкм. Нанесение покрытий осуществляли в вакууме из продуктов электронно-лучевого диспергирования политетрафторэтилена. Исследование трибологических характеристик сопряжений производили на машине трения СМТ-1, оснащенной трибодилатометром PCLW-02. Испытываемые трибосопряжения смазывали путем погружения нижней части вала в ванну с дизельным топливом (ГОСТ 305—82).

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 1 представлены натурные характеристики исследованных резинометаллических сопряжений. В процессе испытаний установлено, что циклический характер изменения присущ не только термоизносной (рис. 1, а), но и фрикционной (рис. 1, б) характеристикам пар трения резина—сталь. Математическая обработка экспериментальных данных показала, что время начала и продолжительность циклов ($t_{\text{ти,ф}}$) для обеих характеристик практически полностью синхронизированы. Их синхронизация оценивается величиной коэффициента корреляции не менее 0,88. Аналогичным образом соотносятся между собой и абсолютные значения амплитуд циклов дилатации ($A_{\text{ти}}$) и момента (коэффициента) трения ($A_{\text{ф}}$) сопряжений. Графическим способом на участке термоизносной характеристики, соответствующем установившемуся тепловому состоянию испытываемого узла трения, может быть определена абсолютная величина износа за один цикл (W). Кроме того, представляется возможным оценить скорость изнашивания как за один, так и за несколько циклов, находящихся на отдельном участке или на всей термоизносной характеристике.

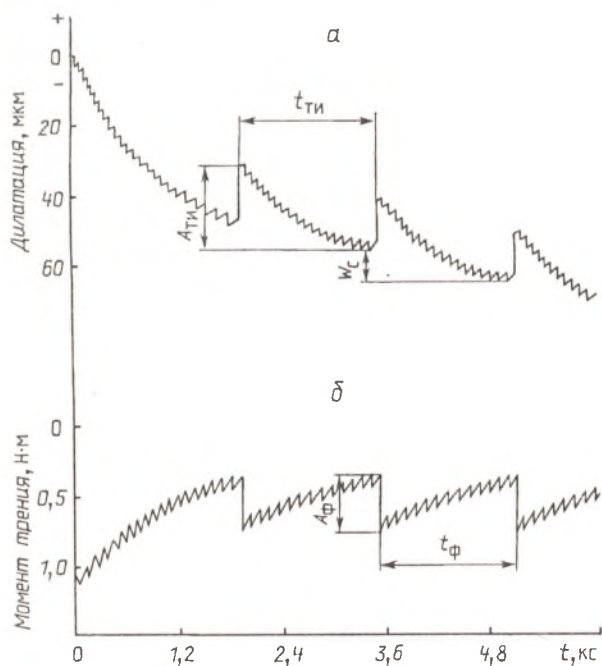


Рис. 1. Термоизносная (а) и фрикционная (б) характеристики резинометаллических сопряжений. Шероховатость стального вала $Ra=0,121$ мкм, нагрузка 50 Н, скорость 0,4 м/с.

Амплитудные характеристики, представленные на рис. 2, а, б, свидетельствуют, что линейный размер трибосопряжений не является постоянной величиной, а циклически изменяется в процессе всего периода испытаний (рис. 2, а, кривая 1). При этом наблюдается чередование циклов термического расширения и изнашивания трибосистем. Использование трибодилатометра PCLW-02 позволяет с высокой точностью оценить абсолютную величину этих циклов. Анализ амплитудной характеристики резинометаллических сопряжений с шероховатостью стального вала $Ra=0,093$ мкм (рис. 2, а, кривая 1) показывает,

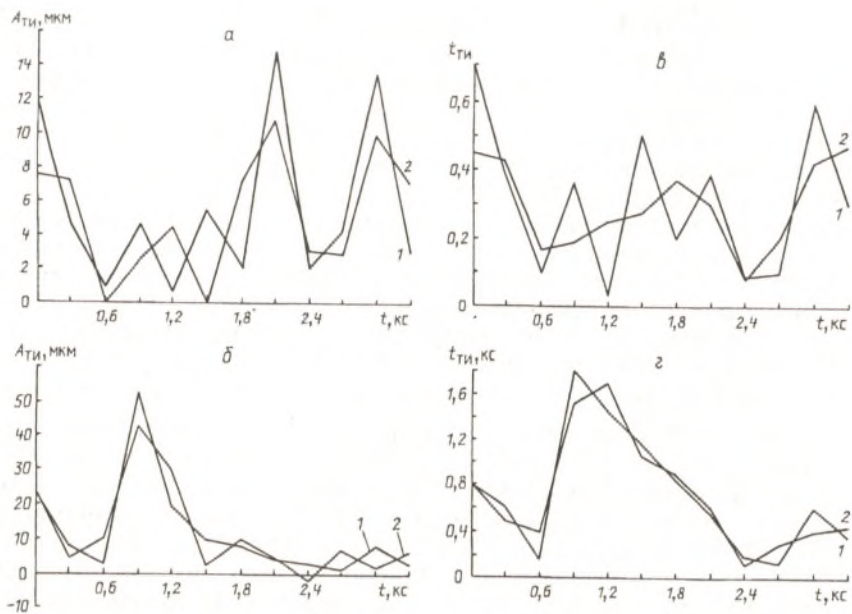


Рис. 2. Амплитудные (а, б) и временные (в, г) характеристики резинометаллических трибосопряжений с шероховатостями стального вала $Ra=0,093$ (а, в) и $0,432$ мкм (б, г): 1 — экспериментальные кривые; 2 — рассчитанные по уравнениям (1), (2) (а, б), (3), (4) (в, г)

что значения амплитуд циклов на термоизносной характеристике находятся в пределах $3,5-13,0$ мкм, а для сопряжений с шероховатостью стального вала $Ra=0,432$ мкм (рис. 2, б, кривая 1) — $5,0-53,0$ мкм. Средние экспериментальные значения амплитуд циклов дилатации, определенные по амплитудным характеристикам резинометаллических сопряжений с шероховатостями стального вала $Ra=0,093$ и $0,432$ мкм, составляют $5,417$ и $11,958$ мкм соответственно. Амплитудные характеристики (рис. 2, а, б, кривые 1), построенные по экспериментально определенным значениям амплитуд циклов дилатации трибосистем, могут быть представлены в виде соответствующих гармонических рядов:

$$A_{ти, 0,093}(t) = 5,417 + 2,4282 \sin(t + 2,7920) + 1,9597 \sin(2t + 1,6076) + 1,4767 \sin(3t - 2,8555) + 3,2479 \sin(4t - 0,0128); \quad (1)$$

$$A_{ти, 0,432}(t) = 11,958 + 11,3599 \sin(t + 0,1364) + 5,7452 \sin(2t - 2,218) + 8,162 \sin(3t + 2,581) + 9,4652 \sin(4t + 1,2287); \quad (2)$$

при этом $\omega=1$.

Расчеты показывают, что амплитудные характеристики, построенные с использованием тригонометрических многочленов (1), (2), достаточно хорошо соответствуют характеристикам (рис. 2, а, б, кривая 1), построенным на основе экспериментально определенных значений амплитуд циклов дилатации трибосопряжений. Степень соответствия оценивается коэффициентами корреляции $0,679$ и $0,902$ для трибосистем с шероховатостями стального вала $Ra=0,093$ и $0,432$ мкм соответственно.

Исследования позволили установить, что значения длительностей циклов являются одним из важнейших параметров, характеризующих процессы, трения и изнашивания резинометаллических сопряжений. Временные характеристики, представленные на рис. 2, в, г, (кривые 1), показывают, что, как и в случае амплитудных характеристик, они

существенно отличаются для трибосопряжений со стальными валами, имеющими различную шероховатость рабочей поверхности, и могут быть представлены соответствующими гармоническими рядами:

$$t_{тн, 0,093} = 0,3125 + 0,09918 \sin(t + 1,7715) + 0,1562 \sin(2t + 2,0303) + 0,01803 \sin(3t - 2,1588) + 0,06557 \sin(4t + 0,3911), \quad (3)$$

$$t_{тн, 0,432} = 0,715 + 0,4989 \sin(t - 0,38) + 0,2817 \sin(2t - 3,0972) + 0,2062 \sin(3t + 2,2531) + 0,2636 \sin(4t + 0,7388), \quad (4)$$

при этом $\omega = 1$.

Средние экспериментальные значения длительностей циклов, определенные по временным характеристикам резинометаллических сопряжений с шероховатостями стального вала $Ra = 0,093$ и $0,432$ мкм, составляют $0,313$ и $0,715$ кс соответственно. Степень соответствия временных характеристик, построенных по экспериментальным (рис. 2, в, г, кривые 1) и рассчитанным (рис. 2, в, г, кривые 2) по уравнениям (3), (4), значениям длительностей циклов оценивается коэффициентами корреляции, равными $0,673$ и $0,935$ соответственно для стальных валов с различной шероховатостью.

Для термоизносной и фрикционной характеристик представляется возможным оценить скорость дилатации и момента трения резинометаллических сопряжений как отношение соответствующих амплитуд (A) циклов к длительности (t) их действия. Скорость дилатации при этом может быть определена как для отдельного цикла, так и для некоторого участка исследуемой характеристики. В обоих этих случаях необходимо учитывать стационарность теплового состояния трибосистемы и динамику его изменения в процессе испытаний.

Еще одним важным параметром, характеризующим трибологические свойства резинометаллических сопряжений, является циклический износ (W_c), т. е. износ за один цикл продолжительностью $t_{тн}$, который, как следует из рис. 1, может быть определен графическим способом непосредственно из экспериментальной термоизносной характеристики. Исследования позволили установить, что среднее значение W_c за весь период испытаний трибосопряжений с шероховатостью стального вала $0,093$ и $0,432$ мкм равняется $2,083$ и $8,50$ мкм соответственно. Испытания также выявили существование линейной связи между величинами циклического и полного износа трибосистем.

Вместе с тем полный износ трибосистем прямо пропорционален средней величине амплитуд циклов ($A_{тн}$) резинометаллических сопряжений (рис. 3). Это свидетельствует о том, что гармонические ряды (1), (2) могут быть использованы для оценки величины износа трибосистем. При этом в качестве предварительного оценочного критерия может

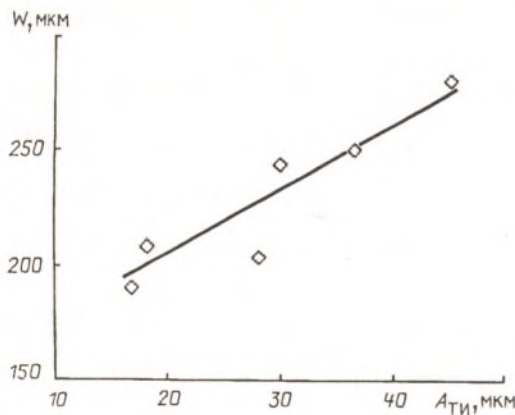


Рис. 3 Зависимость износа сопряжений сталь—резина с покрытием Ф-4 от величины амплитуд циклов термоизносной характеристики. Шероховатость стальных валов $Ra = 0,093 - 0,675$ мкм, нагрузка 50 Н, скорость $0,5$ м/с, продолжительность испытаний $7,2$ кс

выступать среднее за весь период испытаний значение амплитуды циклов, выражающееся первым членом (A_0) соответствующего гармонического ряда.

Заключение. Таким образом, основываясь на результатах проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

установленные экспериментально циклические изменения трибологических параметров резинометаллических трибосистем могут быть представлены в виде гармонических рядов (тригонометрических многочленов);

начало, продолжительность и амплитуда циклов термоизносной и фрикционной характеристик синхронизированы по времени испытаний и оцениваются величиной коэффициента корреляции не менее 0,88;

анализ трибологических характеристик позволил установить, что параметры гармонических рядов зависят от шероховатости поверхности стального вала, входящего в состав испытываемой трибосистемы; средние значения амплитуд и продолжительности циклов, а также циклического износа сопряжений с более шероховатым валом превышают значения аналогичных величин, полученные в процессе испытаний сопряжений с менее шероховатым валом;

экспериментально установленная прямо пропорциональная зависимость износа от амплитуды циклов дилатации позволяет использовать абсолютные значения отдельных параметров (например, амплитуд, гармонических рядов) для оценки величины износа трибосистем.

Summary

Cyclic change of tribological parameters of rubber-metallic tribosystems is experimentally established. It is shown, that the results of researches can be submitted as the harmonic lines (trigonometrical multimembers). Reveals the influence to parameters of the harmonic lines of a roughness of a surface of the steel shaft, included in the structure of the tested tribo-conjugate. It is shown, that the absolute meanings of parameters of the harmonic lines can be used for an estimation of size of the wear and tear of the tribosystems.

Литература

1. Крагельский И. В., Шедров В. С. Развитие науки о трении. Сухое трение. М., 1956.
2. Адам Н. К. Физика и химия поверхностей. М; Л., 1947.
3. Конвисаров Д. В. Внешнее трение и износ металлов. Свердловск; М., 1947.
4. Song Qi, Cui Zhouring, Zhang Renji // Tribology. 1992. Vol. 12, N 1. P. 35—44.
5. Свириденко А. И., Межис Д., Баркен М., Смуругов В. А. // Трение и износ. 1991. Т. 12, №5. С. 795—800.
6. Зозуля В. Д., Шведков Е. Л., Ровинский Д. Я., Браун Э. Д. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев, 1990.
7. Хрущев М. М. Исследования приработки подшипниковых сплавов и цапф. М.; Л., 1946.
8. Wiedemeier J. // Fortschr. Ber. VDI Z. 1985. R.5, N96.
9. Niewczak A. // 6 Symp. "Zuverlässig", Magdeburg, 3—5 Sept., 1990: Tagungsmater. Magdeburg, 1990, S. 41—44.
10. Жарин А. А., Генкин В. А., Роман О. В. // Трение и износ. 1986. Т. 7, № 2. С. 330—341.
11. Пинчук В. Г., Шидловская Е. Г. // Трение и износ. 1989. Т. 10, № 6. С. 965—972.
12. Переверзева О. В., Балакин В. А. // Трение и износ. 1992. Т. 13, № 3. С. 507—516.
13. Богданович П. Н. // Трение и износ. 1995. Т. 16, №3. С. 466—477.
14. Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Подрезов С. А. Тепловая задача металлополимерных трибосопряжений. Ростов-на-Дону, 1987.
15. Браун Э. Д., Буше Н. А., Буяновский И. А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка). М., 1995.

16. Potekha V. L., Nevzorov V.V., Szczerek M. M. // New materials and technologies in tribology. The joint soviet-american conference. 06—09 Oct. 1992. Byelarus, Minsk. P. 205—206.

17. Potekha V. L., Szczerek M. M. // Zjawiska w strefie tarcia. XVIII Jesienna Szkola Tribologiczna cz. II, Komunikaty, 1992. S. 145—154.

18. Потеха В. Л., Щерек М. М., Холодилов О. В. // Трение и износ. 1997. Т. 18, № 1. С. 121-124.

*Гомельский государственный
технический университет,
Белорусский государственный
университет транспорта*

*Поступила в редакцию
15.08.97*