

**Кубич В.И.,
Щаднев А.О.,
Ищенко Л.И.**

Запорожский национальный технический
университет,
г. Запорожье, Украина

К МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПУТИ ТРЕНИЯ В ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯХ СО СЛОЖНЫМ ПЛОСКО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Постановка проблемы

Экспериментальные исследования износостойкости материалов сложнагруженных поверхностей элементов объектов машиностроения основываются на определении ее величины и оценке характера изменения в зависимости от целого комплекса факторов влияния: состав, структура, состояние материалов; внешних условий взаимодействия (среды, амплитуды перемещений, нагружения зон контакта поверхностей). Основным критерием износостойкости является интенсивность изнашивания, определяемая как отношение величины изношенного слоя поверхности к пути трения, на котором произошло изнашивание [1, 2, 4].

В настоящее время разработано и создано ряд экспериментальных установок для моделирования процессов контактного взаимодействия в трибосопряжениях газотурбинных двигателей, которые работают в условиях сложного нагружения, и проведения исследований их износостойкости [3]. Установки позволяют проводить ускоренные испытания моделей фрикционных пар, не только для трибосопряжений газотурбинных двигателей, но и для других объектов машиностроения, например, поршневых двигателей внутреннего сгорания, станочного оборудования. Одной из разработанных установок является установка, позволяющая проводить испытания образцов в виде пластин, нагружаемых в зоне их плоско-параллельного контакта, и перемещаемых друг относительно друга во взаимно перпендикулярных плоскостях с возможным соударением и без него, рис. 1. Оценка состояния контактных поверхностей производилась с использованием трибоспектрального метода - идентификации структурного состояния поверхностного слоя статистическими характеристиками при сканировании алмазным индентором, и метода анализа электронного строения металлов на основе изменения работы выхода свободных электронов [3]. Оценка износа образцов проводилась методом профилографирования с учетом числа циклов наработки, при этом интенсивность изнашивания на пути трения не определялась ввиду отсутствия методики определения его численных данных [4].

Данный факт вызывает необходимость в определении функциональной зависимости пути трения образцов, совершающих сложные цикловые движения.

Полученные результаты позволят производить расчеты интенсивностей изнашивания на пути трения и оценивать износостойкость испытываемых материалов.

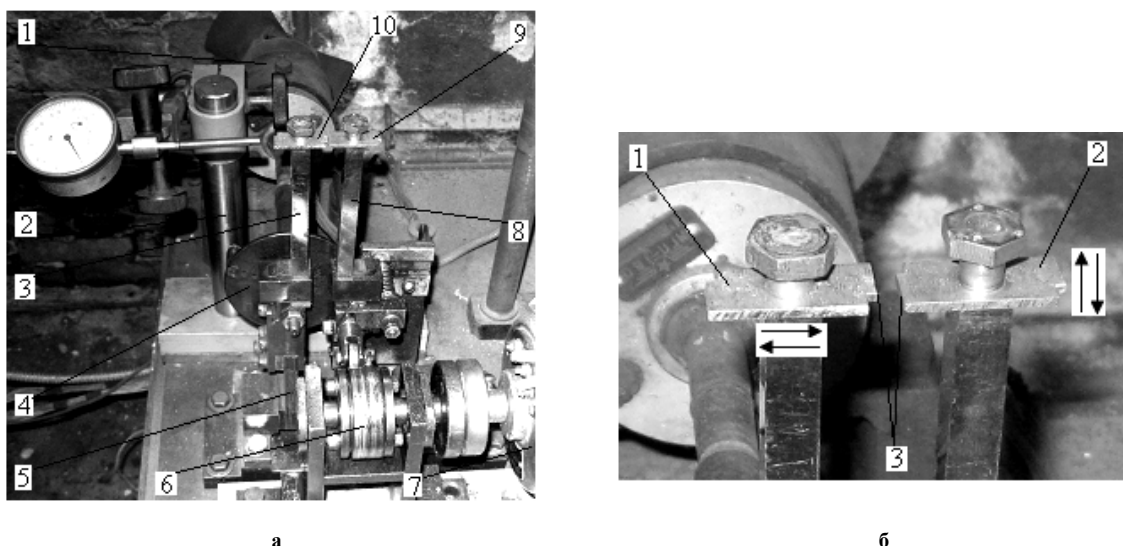


Рис. 1 – Экспериментальная установка:

а – общий вид:

1, 7 – электродвигатели привода образцов; 2 – магнитный штатив с индикаторной головкой;

3, 8 – стойки крепления образцов; 4 – маховичок привода образца;

5 – упругое основание стойки; 6 – вал привода образца; 9, 10 – образцы;

б – вид контакта образцов:

1, 2 – образцы; 3 – поверхности трения образцов

Методы исследования

Пространственная визуализация рассматриваемого сложного движения в трехмерном пространстве в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, полученная с использованием макета экспериментальной установки (рис. 2, а), позволяет прийти к логическому заключению о следующем. Образцы совершают объемное перемещение, а траектория пути трения лежит в плоскости, ориентируемой под определенными углами к осям координат. Величины углов определяются значениями относительных перемещений образцов. Суммарный путь трения точки, располагаемой на линии контакта, обусловлен характером изменения значений двух катетов и представляет собой гипотенузу прямоугольного треугольника (рис. 2, б). При этом, поскольку одно из движений образцов описывается по дуге окружности, гипотенуза может иметь форму, отличающуюся от прямой. Исходя из малости амплитуд взаимных перемещений, в расчетах можно пренебречь фактом непрямолинейной траектории. Тогда суммарный путь трения определится исходя из известного выражения:

$$c^2 = a^2 + b^2, \quad (1)$$

где c – гипотенуза треугольника (суммарный путь трения), мм;

a, b – катеты треугольника (значения смещений по осям координат), мм.

Траектория пути трения на рис. 2, б получена при следующих параметрах: жесткости упругих элементов $c_1 = 0,15$ Н/мм, $c_2 = 0,046$ Н/мм; амплитуда колебаний образцов 50 мм; высота точки линии контакта над базовой поверхностью в исходном положении $H = 230$ мм. При этом графически определенный путь трения за цикл движения составил $L = 54$ мм. Перемещения точки контакта на пути трения за половину цикла в вертикальной плоскости составило – $a = 6,5$ мм, в горизонтальной – $b = 29,5$ мм. Погрешность измерений: амплитуды $\Delta_1 = 3$ мм, высоты $\Delta_2 = 1$ мм; перемещений точки контакта $\Delta_3 = 2$ мм. При этом расчетный путь трения за цикл в соответствии с выражением (1) составил $L_p = 60$ мм. Таким образом, расхождение в расчетном и графически определенном пути трения составляет 11 %, что указывает на возможность применения предложенного подхода к определению пути трения.

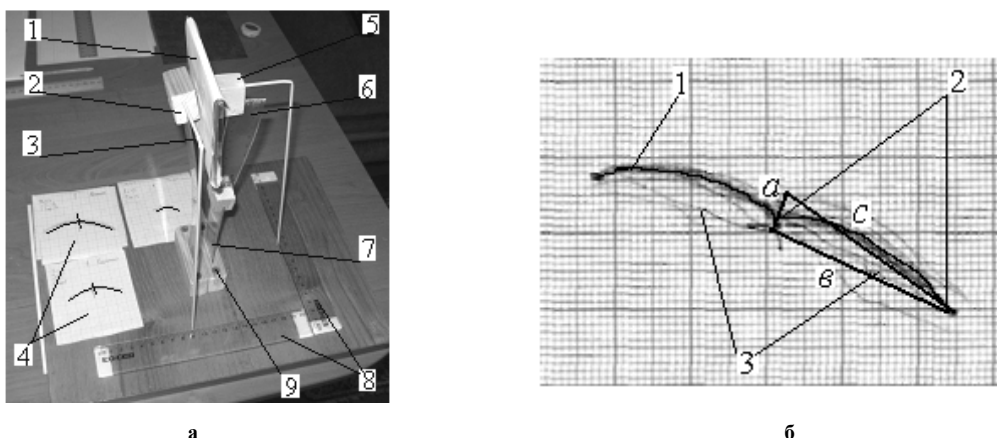


Рис. 2 – Макет установки:

а – общий вид:

- 1 – экран регистрации движения точки контакта образцов; 2 – образец № 1 с указателем продольного перемещения;
- 3, 6, 7 – упругие стойки образцов; 4 – графики пути трения за цикл;
- 5 – образец № 2 с указателем поперечного перемещения;
- 6 – упругая стойка; 8 – шкалы контроля перемещения; 9 – основания стоек образцов;
- б – графическое изображение траектории пути трения за цикл:
 - 1 – форма траектории при синхронизации движения образцов;
 - 2 – исходное и крайнее положение точки на пути трения;
 - 3 – форма траектории при асинхронном движении образцов

Для установления функциональной зависимости пути трения поверхностей от параметров, задающих направления движения предлагается применить метод графического моделирования контактного взаимодействия на основе теории физического подобия, с разложением сложного движения на элементарные простые, с последующим их анализом и математическим описанием. При этом будет учитываться комплекс физических величин, определяющих физический процесс взаимодействия контактируемых поверхностей - первая теорема подобия [5]. К физическим величинам можно отнести частоты вращения валов приводных электродвигателей, амплитуды отклонений поверхностей от исходного положения, жесткости упругих оснований стоек образцов. Для этого подвижный контакт двух поверхностей образцов, приведенных на рис.1, рассматривается в виде двух простых движений во взаимноперпендикулярных плоскостях.

Результаты исследований и обсуждение

Начальными условиями взаимного перемещения образцов целесообразно рассматривать такие, при которых движение начинается из состояния покоя, при этом образцы максимально сближены под действием упругости стоек. Положение линии контакта поверхностей образцов ориентировано по осям координат OX , OY , OZ , рис. 3.

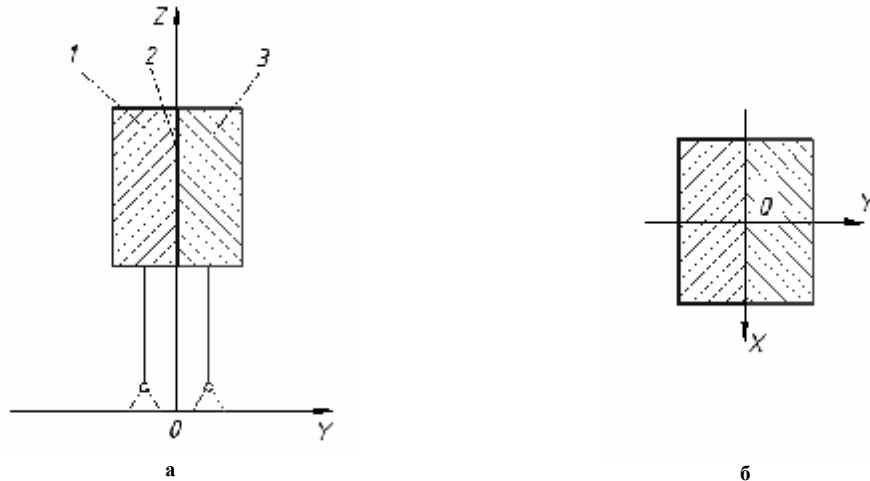


Рис. 3 – Начальные условия взаимного контакта образцов:
 а – образцы в начальном положении в плоскости ZOY ;
 б – образцы в начальном положении в плоскости XOY ;
 1 – образец № 1; 2 – линия контакта образцов; 3 – образец № 2

Последующее сложное движение, осуществляемое при включении приводов образцов, разложено на два простых движения, выполняемых в плоскостях ZOY , ZOX , рис. 4. Образцы 1 и 2 в начальном положении отображены штриховкой, в конечном правом (левом) положении, отображены штрихпунктирной линией. Путь трения в плоскости ZOY показан линией A_2B_2 . Для отображения перемещений, которые совершают образцы 1 и 2 за один цикл работы (один оборот электродвигателя) обозначены точки на линии контакта: B , принадлежащей образцу 1; A , принадлежащей образцу 2.

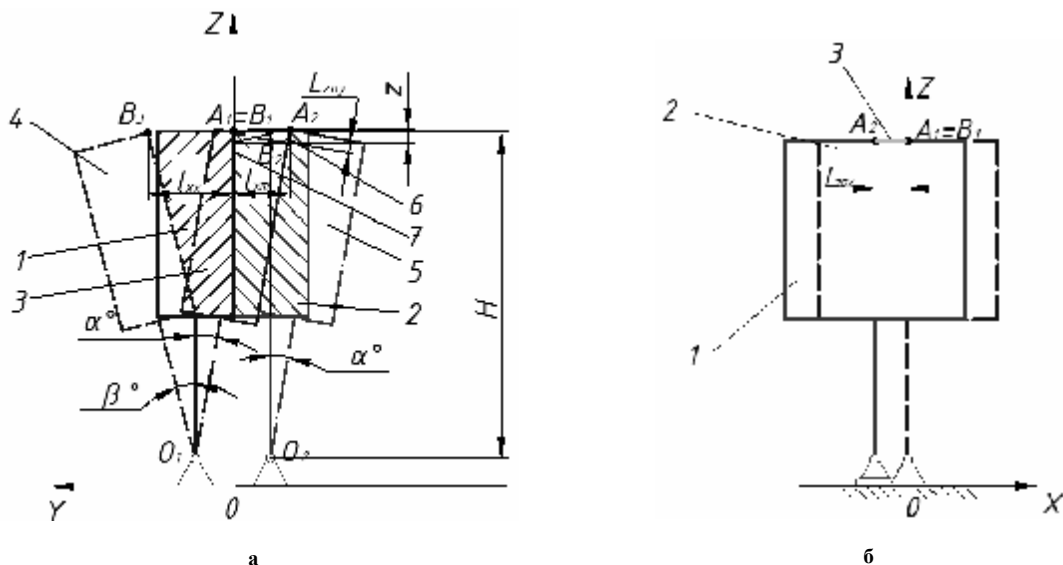


Рис. 4 – Схемы движения образцов:
 а – движение в плоскости ZOY :
 1 – образец № 1 в начальном положении; 2 – образец № 2 в начальном положении;
 3 – образец № 1 в крайнем правом положении; 4 – образец № 2 в крайнем левом положении;
 5 – образец № 2 в крайнем правом положении; 6 – путь трения за полуцикл; 7 – линия контакта образцов;
 б – движение в плоскости ZOX (вид спереди):
 1 – образец № 2 в крайнем правом положении; 2 – первый образец № 1 в начальном положении;
 3 – путь трения за полуцикл

Первое движение - движение точки B . При этом происходит перемещение образца 1, закреплённого на подпружиненной стойке, имеющей жёсткость пружины c_1 . Это движение задается за счет вращения вала электродвигателя привода образца 1 с закреплённым на нём маховичком с грузом. Образец 1, выйдя из состояния покоя, воздействует на образец 2, при этом происходит поворот обоих образцов относительно их центров качения O_1 и O_2 на угол α , следствием чего является трение образцов по линии контакта 7. Угол α отображает крайнее правое положение образцов 1 и 2. Он является варьируемой величиной и зависит от жесткости c_2 набора пружинных пластин образца 2. При движении образцов из начального положения в конечное положение путь трения в соответствии с геометрическими и тригонометрическими параметрами определится следующим образом, рис. 5.

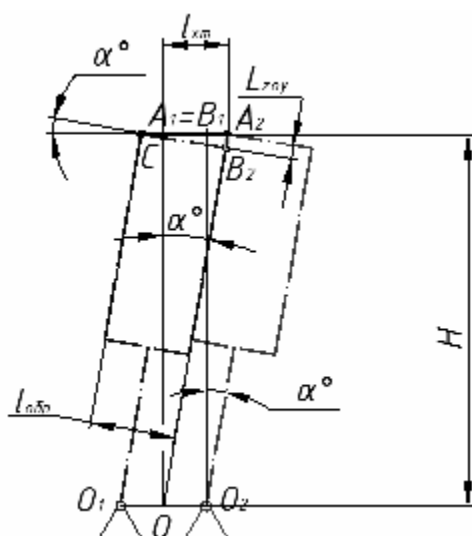


Рис. 5 – Схема определения параметров:

$l_{обp}$ – ширина образца;

l_{xm} – амплитуда перемещения при трении;

$L_{зoу}$ – путь трения за цикл;

H – расстояние от точки исходного контакта до центра оси качения образца

Исходя из графического анализа взаимного расположения вершин треугольников, рис. 5, следует, что точка C принадлежит двум треугольникам $\Delta A_1B_2A_2$ и ΔOA_1A_2 , и ее координата z максимально приближена к высоте H , относительно которой производятся дальнейшие расчеты. С учетом того, что в реальности амплитуды перемещений малы, то приведенный подход не внесет существенной погрешности в определении пути трения.

Из треугольника ΔOA_1A_2 следует:

$$\operatorname{tg} \alpha \approx \frac{l_{xm}}{H}, \quad (2)$$

где l_{xm} – амплитуда перемещения при трении, мм. Величина амплитуды – регулируемая, и измеряется с помощью оптиметра (задаётся по условиям проведения эксперимента);

H – расстояние от точки исходного контакта до центра оси качения образца, мм.

Из треугольника ΔCA_2B_2 следует:

$$A_2B_2 = CB_2 \sin \alpha = l_{обp} \sin \alpha = l_{обp} \sin \operatorname{arctg} \frac{l_{xm}}{H},$$

$$l_{зoу} = l_{обp} \sin \operatorname{arctg} \frac{l_{xm}}{H}, \quad (3)$$

где $l_{зoу}$ – путь трения за полуцикл, мм;

$l_{обp}$ – ширина образца №1, мм;

α – угол, на который отклоняются образцы от начального положения при ходе трения образцов, град.

Поскольку, за рабочий цикл образцы 1 и 2 совершают движение из начального положения в крайнее правое положение, а затем и возвращаются снова в начальное, то выражение (3) примет вид:

$$l_{zoy} = 2l_{обр} \sin \arctg \frac{l_{xm}}{H}, \quad (4)$$

Далее следует цикл холостого хода, под которым следует понимать цикл разрыва контакта между образцами – трение между образцами отсутствует. Образец 1 отклоняется от центра качения O_1 на угол β . При этом углы α и β , и жесткости упругих элементов стоек c_1, c_2 соотносятся как:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{c_2}{c_1 + c_2}, \quad (5)$$

где α – угол, на который отклоняются образцы от начального положения при трении образцов, град;

β – угол, на который отклоняются образцы от начального положения при холостом ходе образцов, град;

c_1 – жесткость набора пружинных пластин первого образца, Н/мм;

c_2 – жесткость набора пружинных пластин второго образца, Н/мм.

Таким образом, за один оборот электродвигателя в плоскости ZOY совершается как движение холостого хода, так и движение при котором происходит трение. Тогда путь трения в этой плоскости при условии разрыва контакта определится:

$$L_{zoy} = l_{обр} n_1 t \sin \arctg \frac{l_{xm}}{H}, \quad (6)$$

где n_1 – частота вращения электродвигателя привода образца 1, мин⁻¹;

t – время работы двигателя привода образца 1, мин.

Второе движение – движение точки A , происходящее в плоскости ZOX . Характер движения в плоскости ZOX отличается от движения в плоскости ZOY следующим: в движение приводиться образец 2, за счёт привода электродвигателем и эксцентриком, которые сообщают образцу 2 прямолинейное возвратно-поступательное движение в плоскости ZOX . При неподвижном образце 1 трение будет происходить непрерывно, а путь трения определится как:

$$L_{zox} = l_{zox} n_2 t, \quad (7)$$

где n_2 – частота вращения электродвигателя привода образца 2, мин⁻¹;

t – время работы двигателя, мин;

l_{zox} – амплитуда перемещения при трении в плоскости ZOX , мм. Величина амплитуды движения регулируемая и измеряется с помощью оптиметра (задаётся по условиям проведения эксперимента).

За половину оборота привода образца 1 точка линии контакта B проходит путь равный $2l_{zoy}$. Если количество оборотов приводных электродвигателей $n_1 = n_2$, то за пол оборота привода образца 2 точка A проходит путь равный l_{zox} . В последующие пол-оборота привода образца 1 происходит размыкание линии контакта образцов 1, 2, в связи с этим трение будет отсутствовать. При этом трибозаимодействие будет таким, что фактически трение будет происходить за пол-оборота электродвигателей с частотами n_1, n_2 . Исходя из этого, возникает необходимость в учете асинхронности работы приводных двигателей.

Тогда суммарный путь трения, обусловленный двумя простыми движениями на основании выражения (1), может быть представлено в следующем виде:

$$L = \sqrt{L_{zoy}^2 + (kL_{zox})^2}, \quad (8)$$

где k – коэффициент, учитывающий асинхронность в работе электродвигателей приводов образцов 1, 2. Определяется по отношению:

$$k = \frac{n_2}{n_1}, \quad (9)$$

Коэффициент показывает, на какое количество движений образца 2 приходится движений, сопровождающихся трением и перемещением точки по линии контакта. В том случае если привод образца 1 отключен, то коэффициентом k необходимо пренебречь.

Введение коэффициента асинхронности во второй член выражения (8) под корнем обусловлено тем, что трение происходит только тогда, когда в фазу трения входит образец 1, т.е. когда между образ-

цами есть подвижный контакт, задаваемый амплитудой его привода. Перемещение при контактном взаимодействии образцов 1 и 2 будет иметь место только в случае, когда образец 1 поворачивается вокруг своей оси качания на угол α . Чем чаще это происходит, тем больше путь трения, поскольку большее время протекает контактное взаимодействие между поверхностями образцов.

Таким образом, с учётом выражений (2 - 7) выражение (8) примет вид:

$$L = \sqrt{\left(2l_{обp}n_1t \sin \arctg \frac{l_{xm}}{H}\right)^2 + (kl_{zox}n_2t)^2}, \quad (10)$$

С учетом выражения (9) выражение (10) примет вид:

$$L = \sqrt{\left(2l_{обp}n_1t \sin \arctg \frac{l_{xm}}{H}\right)^2 + \left(\frac{n_2^2 l_{zox} t}{n_1}\right)^2}. \quad (11)$$

В соответствии с полученной математической зависимостью (11), на основании численных значений параметров испытаний, произведенных на макете экспериментальной установки, рассчитаны пути трения и выполнена оценка полученных результатов, табл. 1.

Таблица 1

Результаты оценки адекватности полученных результатов

Наименование параметра	Номер опыта			
	1	2	3	4
Частота перемещений образцов в цикле: n_1 , мин ⁻¹ n_2 , мин ⁻¹	1 1	1 1	1 1	1 1
Амплитуда перемещений образцов: l_{xm} , мм l_{zox} , мм	60 70	50 50	35 35	23 23
Ширина образца $l_{обp}$, мм	28	28	28	28
Расстояние H , мм	230	230	230	230
Условное время цикла испытания t , мин	1	1	1	1
Графический путь трения L_{gp} , мм	63	54	39	26
Расчетный путь трения L_p , мм	71,4	51,4	36	23,7
Процентные расхождения L_{gp} от L_p	13,3	4,9	7,7	8,8

Из данных табл. 1 следует, что расхождения в значениях расчетного и графического пути трения находятся в пределах 4,9 - 13,3 %.

В соответствии с полученной математической зависимостью (11) и на основании априорных численных значений параметров испытаний произведены расчеты пути трения для образцов, совершаемых сложное взаимное перемещение при использовании рассмотренной конструкции испытательной установки, табл. 2.

Таблица 2

Сводные данные о расчетном пути трения на основе априорной информации о параметрах испытаний

Наименование параметра	Варианты численных значений					
	1	2	3	4	5	6
Частота вращения электродвигателя: n_1 , мин ⁻¹ n_2 , мин ⁻¹ l_{xm} , мм l_{zox} , мм $l_{обp}$, мм	1200 1200 2 2 28	1200 100 2 0,5 28	1500 1250 3 2 28	1250 1500 1 0,5 28	1500 100 3 0,5 28	2000 1500 2 2 28
Высота стойки H , мм	230	230	230	230	230	230
Время испытания t , мин	30	60	90	120	150	180
Расчетный путь трения L , м	74,1	35	211,8	114	164,3	411,3

Выводы

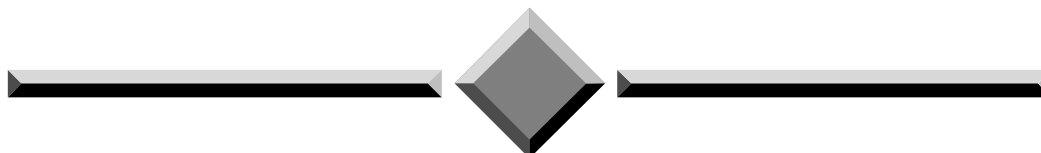
Предложенные подходы к графическому моделированию сложного движения образцов с плоскопараллельным относительным перемещением позволили получить вид математической зависимости расчетного пути трения от параметров испытаний.

Полученные результаты позволяют произвести расчеты пути трения образцов, что лежит в основе определения их интенсивностей изнашивания и оценке износостойкости испытываемых материалов.

Литература

1. Куксенова Л.И. Методы испытаний на трение и износ: Справочное пособие / Л.И. Куксенова, В.Г. Лаптева, А.Г. Колмаков, Л.М. Рыбакова. – М.: Интермет инжиниринг, 2001. – 152 с.
2. Справочник по триботехнике: в 3-х т. Т.1 Теоретические основы / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
3. Ивченко Л.И. Ускоренные испытания сложнагруженных деталей трибосопряжений / Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов, В.И. Черный // Вісник двигунобудування. – 2009. – № 1. – С. 150-154.
4. ГОСТ 23.224-86. Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей. М.: Издательство стандартов, 1986. – С. 28.
5. Браун Э.Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э.Д. Браун, Ю.А. Евдокимов, А.В. Чичинадзе – М.: Машиностроение, 1982. – 192 с.

Надійшла 23.12.2011



ЧИТАЙТЕ

журнал

“Problems of Tribology”

во всемирной сети

INTERNET !

<http://www.tup.km.ua/science/journals/tribology/>