

Кузьменко А.Г.Хмельницкий национальный университет,
г. Хмельницкий, Украина
E-mail: tribosenator@gmail.com**МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗНОС ПРИ
ПЕРЕМЕННОЙ ПЛОЩАДКЕ КОНТАКТА С
ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ПАРАМЕТРОВ k_w, m
МОДЕЛИ ИЗНАШИВАНИЯ (МПП) k_w, m**

УДК 621.891

Изложены теория и практика метода испытаний на износ: 1) при переменной площадке контакта; 2) с определением параметров модели изнашивания. Дана информация о новой системе знаний (концепции) основанной на контактной механике сопряжений и новых методах трибологических испытаний.

Ключевые слова: метод испытаний на износ, переменная площадка контакта, модель изнашивания.

Часть 1. Теория метода**Введение**

Чтобы понять во время путешествия где мы находимся надо посмотреть на общую карту и определиться со своими координатами.

При чтении научной статьи, чтобы определиться с местом новой информации в общем потоке и в работах автора целесообразно ознакомиться с сайтом автора (статьи) в интернете, как с наиболее полной информацией о его работах. В данном случае целесообразно ознакомиться с сайтом автора : “ Новые знания как система, концепция или парадигма в трибологии. new-tribology.abga.ru”

Здесь приведем краткую информацию о некоторых разделах сайта, имея которую можно связать содержание предлагаемой статьи как с общим развитием трибологии, так и с работами автора в этой области.

Концепции в трибологии, развиваемые на территории СССР, СНГ в последние 50 - 75 лет.

1. Первая концепция Крагельского – Демкина, Гаркунова – Чичинадзе.

Сущность этой концепции заключалась в следующем: 1) все основные закономерности в контакте, трении и износе поверхностей можно построить исходя из параметров шероховатостей контактирующих поверхностей, как основного фактора, определяющего трибологические процессы. 2) универсальная аналитическая модель изнашивания может быть построена, исходя из закономерностей усталостного разрушения микронеровностей; 3) Среди методов повышения износостойкости наиболее перспективный метод избирательского переноса Крагельского - Гаркунова; 4) Среди факторов влияющих на трибо-процессы главным признавалась температура с моделями и методами расчетов по Чичинадзе.

2. Вторая концепция Костецкого-Бершадского или концепция вторичных структур. Основой этой концепции являлись утверждения:

1. Главным механизмом изнашивания признавались химико-механические процессы на контактных поверхностях: окисление, фазовые превращения.

2. Главным фактором влияющим на износ признавалась скорость окислительных процессов на изнашиваемых поверхностях

3. Главной закономерностью изнашивания признавалась зависимость износа от скорости скольжения, имеющая минимум в некоторой экстремальной точке

4. Главным способом борьбы с износом принимался метод оптимальной скорости скольжения

5. Главным идеологическим принципом принимались утверждения о невозможности построения общих физико-математических моделей изнашивания.

На протяжении почти 50 лет на территории СССР длилась «холодная война» между первой и второй концепциями, свойственная, как политикам, так и учёным тех времен. Костецкий в принципе не признавал «кучерявые» формулы Крагельского, Крагельский не признавал важности «карытообразной» кривой Костецкого. Революция 1993 г загасила эту «холодную войну», как и все другие, холодным душем изъятия финансовых средств выделяемых на науку.

Сущность третьей концепции:

Представленные здесь на сайте новые знания в трибологии, можно полагать как Третью концепцию по трибологии рожденную на территории СНГ. Это третья концепция с определяющей ролью контактной трибомеханики в теоретической и экспериментальной трибологии.

1. Главным признаком этой концепции является признание контактной механики, как раздела механики твердого деформированного тела, основой для создания современной трибологии.

2. Иными словами признание того, что главным фактором влияющим на трение и износ являются контактное давление и напряжение трения.

3. Главными задачами изначально являются контактные задачи для узлов трения с определением силовых, кинематических и температурных характеристик в контакте, с учётом трения, износа и смазки.

4. Главным способом построения моделей изнашивания является не теоретический, а экспериментальный метод, разработанный на основе решений контактных задач с учетом методов испытаний на износ.

5. В ряду задач повышения износостойкости, одним из главных является метод экспериментальной оценки эффективности борьбы с износом.

Сущность концепции нового уровня и этапы развития трибологии, подробно изложенные в монографиях, состоит в следующем. Главная задача трибологии дать научные основы методам повышения износостойкости и надежности узлов трения машин. Решение задачи повышения износостойкости проходит через две стадии:

Стадия I. Разработка, применение, использование одного из многочисленных методов повышения износостойкости узлов трения: 1) конструкторского; 2) технологического – материалы поверхностей; 3) смазка и присадки; 4) радикальные мероприятия.

Стадия II. Обоснованная оценка эффективности метода и выбора его среди множества других методов. В оценке эффективности метода повышения износостойкости главное – разработка математической модели процесса изнашивания узла трения. На создание таких моделей направлена большая часть трибологии как науки. Оценка эффективности метода выполняется в несколько шагов или этапов.

Шаг 1. Определение силовых, кинематических, температурных и смазочных условий, в которых работает узел. Силы и моменты, действующие на узел, определяются методами механики и теории машин и механизмов. Для определения контактных давлений как основного фактора, влияющего на износ, используются решения контактных задач механики упруго и пластически деформируемого тела без учета износа (начальное состояние узла).

Шаг 2. Выбор модели изнашивания пары трения и определение параметров модели изнашивания в реальных условиях, определенных на этапе 1 для разных методов повышения износостойкости. Для определения параметров модели изнашивания проводятся испытания на износ, с этой целью разрабатываются соответствующие методы испытаний.

Шаг 3. Определение износа узла трения при использовании разных методов повышения износостойкости с использованием выбранной модели изнашивания и решения соответствующей контактной задачи для узла трения с учетом износа.

Шаг 4. Определение надежности узла трения по износу и экономической эффективности использования выбранного метода повышения износостойкости.

Опубликованные монографии автора направлены на решение задач на разных этапах оценки эффективности методов повышения износостойкости;

Отражение третьей концепции в монографиях автора, представления о которых дано в материалах сайта:

1) в томах 1, 2, 3, 4 излагаются методы решения упругих и пластических контактных задач, необходимых для определения условий работы узла трения в соответствии с этапом 1; предложены принципиально новые методы решений герцевских и квазигерцевских контактных задач упругости и задач пластичности;

2) в томе 6 изложены модели изнашивания и методы испытаний на износ с определением параметров этих моделей;

3) в томе 5 изложены методы решения контактных задач с учетом износа применительно к подшипникам скольжения, методы необходимые для решения основной задачи трибологии на этапе 3;

4) в томе 7 изложены методы определения надежности узлов трения по критерию износостойкости;

5) в томе 8 изложены методы и результаты исследования смазки в узлах трения;

6) в томе 11 показана практика реализации изложенной концепции на примере шаровых опор автомобиля;

7) в томе 9 изложена прикладная теория твердости металлов и ее приложения.

Новый текущий этап в развитии новой трибологии состоит в том, что бы довести до сознания специалистов трибологов приведенную здесь информацию и помочь в процессе ее изучения и понимания.

Этот процесс можно вести на двух уровнях: 1) в учебных программах вузов, изучающих трибологию и триботехнику; 2) в среде специалистов трибологов через семинары, конференции «системы повышения квалификации».

В Украине: 1) можно вести речь о распространении информации о новой трибологии только на втором уровне, т.е. среди специалистов; 2) нет ни одного вуза, в которых была бы специальность триботехника; 3) родственная специальность «оборудования и технология восстановления и повышения износостойкости деталей машин и конструкций» выродилась в бакалаврат сварщика, из программ которого исключен единственная нормативная трибологическая дисциплина триботехника и основы надежности; 4) в ХНУ (Хмельницкий), преподавание трибологии выполняется энтузиастами в ряде дисциплин по выбору вуза.

В России имеется ряд достаточно мощных трибологических центров и вузов, в которых есть специальность «триботехника»: БГТУ (Брянск), СГТУ (Самара), РГУПС (Ростов на Дону); СФУ (Красноярск), ГРУПС (филиал Кропоткин), ПГУ (Пенза), СПИМ (С.Петербург). ВОЕМех (С.Петербург), ЮРГТУ (Новочеркасск, Шахты).

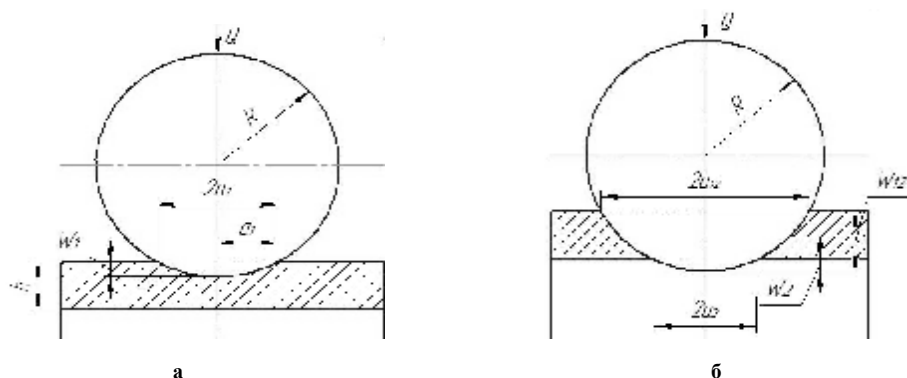
Эксперимент – ядровой концепции в трибологии**1. Общая Теория метода испытаний на износ при переменной площадке контакта с определением параметров модели изнашивания МПП k_w, m** **1.1. Схема испытаний и геометрия контакта**

Рис. 1 – Схема изнашивания только слоя (а) и слоя и основания (б)

Рассматривается контактное взаимодействие вращающегося n , об/мин шара, радиуса R и неподвижной плоскости при действии нагрузки Q .

Плоская поверхность, покрытая тонким слоем толщиной h . При вращении не изнашиваемого шара, сначала изнашивается тонкий слой с образованием круговой сферической лунки с радиусом a_1 , максимальную глубину w_1 .

При дальнейшем вращении шара, когда слой износится на всю толщину h , начинается изнашиваться на величину w_2 плоская основа, на которой закреплен тонкий слой. При этом радиус круговой площадки на основном металле обозначим через a_2 , общий износ слоя и основание обозначим через w_{12} .

Ставится задача найти соотношение между геометрическими величинами.

Из геометрии касания пересечения окружности и плоскости при малой стреле хорде при использовании разложения функции окружности в степенной ряд следует:

1) по схеме (рис 1, а) для максимальной глубины изнашивания только слоя w_1 следует:

$$w_1 = \frac{a_1^2}{2R}; \quad (1.1)$$

2) при одновременном износе слоя и основания (рис 1, б) суммарный износ w_{12} можно выразить через радиус площадки контакта, a_{12} но зависимости:

$$w_{12} = \frac{a_{12}^2}{2R}; \quad (1.2)$$

3) при радиусе износа только основания a_2 максимальный износ только основания определится по зависимости:

$$w_2 = \frac{a_2^2}{2R}; \quad (1.3)$$

4) толщина слоя h при известных значениях величин a_{12} и a_2 можно определить из соотношения:

$$h = w_{12} - w_2; \quad (1.4)$$

или с учетом (1.2) и (1.3):

$$h = \frac{a_{12}^2 - a_2^2}{2R}, \quad (1.5)$$

для удобства (1.5) можно записать в виде:

$$h \frac{(a_{12}^2 - a_2^2)(a_{12} + a_2)}{2R} = \frac{xy}{2R}; \quad (1.6)$$

где в обозначениях [1]:

$$(x = a_{12} - a_2); (y = a_{12} + a_2).$$

1.2. Постановка общей контактной задачи с износом

1.2.1. Общие положения

Рассматривается контактное взаимодействие изнашиваемого шара и не изнашиваемой плоскости. Ставится задача получить зависимость износа шара при известных параметрах модели изнашивания.

1) модель изнашивания шара принимается в дифференциальной форме вида:

$$\frac{du_w}{ds} = k_w \sigma^m, \quad (2.1)$$

где u_w – износ поверхности шара по нормам;

s – путь трения для контактных точек изнашиваемой поверхности;

σ – давление в контакте;

k_w, m – параметры модели изнашивания;

2) основное допущение при постановке и решении задачи принимаем следующее допущение: полагаем, что на протяжении всего процесса изнашивания давление распределяется по площадке контакта равномерно при этом давление зависит от пути трения:

$$\sigma(s) = \frac{Q}{\pi a^2(s)}; \quad (2.2)$$

где Q – общая нагрузка на сопряжение,

a – радиус круговой площадки контакта возникающей в процессе изнашивания,

s – как упоминалось, путь трения.

1.2.2. Вывод дифференциального уравнения общей контактной задачи с учетом износа

Любая контактная задача формулируется с помощью двух основных соотношений:

- условия сплошности в контакте и уравнения равновесия контактирующих тел ;

- условие сплошности в контакте в случае контактной задачи с учетом износа.

1а) формулируется в виде соотношения:

$$w(x) = u(x), \quad (2.3)$$

где $w(x)$ – распределение износа (по нормам к поверхности) по координате x касательной к поверхности;

$u(x)$ – распределение нормальных смещений контура поверхности шара относительно контура плоскости, исходя из геометрии контакта;

1б) с учетом допущения (2.2) о равномерности распределения давлений в процессе изнашивания можно полагать равномерными распределениями по поверхности износ w и геометрическое смещение u и считать их зависящими только от пути трения, тогда следует:

$$w(s) = u(s); \quad (2.4)$$

1с) геометрические перемещение $u(s)$ для контакта шара и плоскости путем разложения в степенной ряд функции поверхности шара в точке контакта с точностью до малых второго порядка представим в виде соотношения:

$$u(s) = \frac{a^2(s)}{2R}. \quad (2.5)$$

Тогда из (2.4) имеем:

$$w(s) = \frac{a^2(s)}{2R}; \quad (2.6)$$

2) условие равновесия в контакте:

2а) это условие равенства внешней силы Q , приложенной к сопряжению и сумма нормальных контактных давлений $\sigma(s)$, действующих в контакте в любой момент времени или точнее при любом пути трения S :

$$Q = \int_0^{a(s)} \sigma(a(s)) ds = \pi a^2(s) \sigma(s); \quad (2.7)$$

2б) или проще опуская обозначение S :

$$Q = \pi a^2 \sigma, \quad (2.8)$$

Но понимая значения a и σ в любой момент процесса изнашивания;

3) в случае контактной задачи с износом к соотношениям сплошности (2.5) и равновесия (2.7) следует добавить соотношения модели изнашивания (2.1);

3а) тогда полная система уравнений контактной задачи с износом имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} w(s) = u(s) &= \frac{a^2(s)}{2R} & 2.5; \\ Q &= \pi a^2(s) \sigma(s) & 2.8; \\ \frac{du_w(s)}{ds} &= k_w \sigma^m(s) & 2.1; \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

3б) общая система содержит два алгебраических уравнения (2.5), (2.8) и одно дифференциальное уравнение (2.1).

1.3. Постановка и решение прямой контактной задачи с износом (КЗИ)

1.3.1. Постановка прямой КЗИ

1) из системы уравнений (2.9) определяющий износ поверхности шара в форме радиуса $a(s)$ площадки контакта при любом пути трения S , если при этом задача параметра модели изнашивания;

2) учитывая дифференциальное уравнение в системе (2.9) необходимо иметь начальные условия; в процессе изнашивания возможно два типа начальных условий;

2а) в начальный момент процесса изнашивания радиус площадки контакта равен нулю:

$$a(s=0) = 0; \quad (3.1)$$

2б) в начальный момент процесса изнашивания площадки контакта задана и отличается от нуля

$$a(s=0) = a_0; \quad (3.2)$$

2с) таким образом в случае решения прямой задачи систему уравнений (2.9) необходимо решать при выполнении условий (3.1) или (3.2).

1.3.2. Эксперимент – ядро новой концепции трибологии

Теория без практики мертва, а практика без теории слепа, поговаривал солдатам великий полководец Александр Васильевич Суворов.

Подобно этому в трибологии, как и во всей физике, математические методы модели в трибологии необходимы, но недостаточно; точно так же без методов испытаний в частности на износ нет трибологии, но результаты этих методов мало что дают без математических методов, изучающих эти процессы.

Основной ущерб результатов испытаний без теоретических моделей состоит в случайном их характере в деле прогнозирования процессов в частности износа, а прогнозирования и есть главная задача науки.

Предявленный в данной статье метод испытаний на износ с определением параметров модели изнашивания, направлен на обоснованное сравнение износостойкости разных пар трения с последующим использованием в оценке износостойкости не пар, а узлов трения.

1.3.3. Решение прямой контактной задачи с износом

Система уравнений прямой контактной задачи для шара и плоскости с износом шара сводится к полной системе уравнений (2.9) с граничными условиями (3.1) или (3.2).

$$\left. \begin{aligned} w(s) = u(s) &= \frac{a^2(s)}{2R} & 2.5; \\ Q &= \pi a^2(s) \sigma(s) & 2.8; \\ \frac{du_w(s)}{ds} &= k_w \sigma^m(s) & 2.1; \\ a(s=0) &= 0 & 3.1; \\ a(s=0) &= a & 3.2. \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Прямыми преобразованиями система (3.3) сведется к одному дифференциальному уравнению:

1) дифференциала (2.5), получаем:

$$\frac{dw(s)}{ds} = \frac{a(s)}{R} \frac{da(s)}{ds}; \quad (3.4)$$

2) подставляя (3.4) в (2.1), получаем:

$$k_w \sigma^m(s) = \frac{a(s)}{R} \frac{da(s)}{ds}; \quad (3.5)$$

3) подставляя (3.5) и (2.8) получаем основное дифференциальное уравнение в форме:

$$k_w \left(\frac{Q}{\pi a^2(s)} \right)^m = \frac{a(s)}{R} \frac{da(s)}{ds}, \quad (3.6)$$

или преобразовывая, имеем:

$$(Q/\pi)^m k_w R = a^{2m+1} \frac{da(s)}{ds}, \quad (3.7)$$

и далее

$$(Q/\pi)^m k_w R ds = a(s)^{2m+1} da(s); \quad (3.8)$$

4) решая это обыкновенное дифференциальное уравнение методом разделения переменных, получаем:

$$(Q/\pi)^m k_w R S = \frac{a(s)^{2m+2}}{2m+2} + c; \quad (3.9)$$

5) постоянная для интегрирования c определяется из начальных условий: (3.1) или (3.2):

- для случая (3.1) $a(s=0) = 0$ имеем:

$$c = 0; \quad (3.10)$$

- для случая (3.2) $a(s=0) = a_0$ имеем:

$$c = -\frac{a_0^{2m+2}}{2m+2}; \quad (3.11)$$

б) для случая (3.1) подставляя (3.10) в (3.11) имеем решение в форме:

$$Q(\pi)^m k_w R S = \frac{a(s)^{2m+2}}{2m+2}, \quad (3.12)$$

или
$$a(s) = \left[(2m+2)(Q/\pi)^m k_w R S \right]^{\frac{1}{2m+2}}; \quad (3.13)$$

7) для случая (3.2), подставляя (3.11) в (3.9), имеем:

$$(Q/\pi)^m k_w R S = \frac{a(s)^{2m+2}}{2m+2} - \frac{a_0^{2m+2}}{2m+2}, \quad (3.14)$$

или после преобразований:

$$a(s) = \left[(Q/\pi)^m k_w R S + \frac{a_0^{2m+2}}{2m+2} (2m+2) \right]^{\frac{1}{2m+2}}$$

или
$$a(s) = \left[(2m+2)(Q/\pi)^m k_w R S + a_0^{2m+2} \right]^{\frac{1}{2m+2}} \quad (3.15)$$

На этом решение прямой контактной задачи по схеме шар-плоскость с износом шара заканчивается. С площадью полученных зависимостей (3.13) и (3.15) можно определить размеры площадок контакта при изнашивании в случаях, если известны параметры модельных изнашивания k_w, m .

Далее приводится постановка и решение обратной контактной задачи, направленной на определение параметров k_w, m из эксперимента по изнашиванию шара на плоскости.

1.4. Обратная контактная задача с износом

1.4.1. Постановка обратной контактной задачи с учетом износа

1) из решения системы уравнений (2.9) при известной из эксперимента функции $a(s)$ - изменения размера площадки контакта от кута трения, определить параметры k_w, m модели изнашивания поверхности шара;

2) для определенности при условии (3.1) получаем, что экспериментальная зависимость $a(s)$ представим в виде степенной функции вида:

$$a(s) = cs^\beta, \quad (4.1)$$

2а) где параметры аппроксимации c и β могут быть определены методом наименьших квадратов, или в первом приближении по двум точкам (a_1, s_1) , (a_2, s_2) взятых на экспериментальной кривой по зависимостям:

$$\beta = \frac{\lg a_1/a_2}{\lg s_1/s_2}; \quad c = \frac{a_1}{s_1^\beta}. \quad (4.2)$$

1.4.2. Решение обратной контактной задачи для случая нулевой начальной площадки контакта (3.1), $a_0 = 0$

1. Для решения задачи подставим в зависимость (3.13) экспериментальное соотношение (4.1):

$$(cs^\beta)^{2m+2} = (2m+2)(Q/\pi)^m k_w RS. \quad (4.3)$$

В результате имеем одно уравнение с двумя неизвестными параметрами k_w, m модели изнашивания.

2. Взяв две точки на экспериментальной кривой $a(s)$ можно получить из одного уравнения (4.3) систему двух уравнений из, которой можно определить два параметра k_w, m .

3. Более компактного решение можно получить, представив (4.3) в форме:

$$c^{2m+2} S^{2m\beta+2\beta} = (2m+2)(Q/\pi)^m k_w RS. \quad (4.4)$$

4. Из условия выполнимости решения (4.4) при всех значениях S следует:

$$2\beta + 2\beta = 1 \quad (4.5)$$

отсюда:

$$m = \frac{1-2\beta}{2\beta}. \quad (4.6)$$

5. Далее с учетом (4.6) из (4.4) имеем:

$$k_w = \frac{c^{2m+2}}{(2m+2)(Q/\pi)^m R}. \quad (4.7)$$

Соотношениями (4.6), (4.7) заканчивается решение обратной задачи для случая $a(s=0) = 0$ и определение параметров k_w, m модели изнашивания в форме:

$$\frac{du_w(s)}{ds} = k_w \sigma^m(s). \quad (4.8)$$

1.4.3. Решение обратной контактной задачи для случая ненулевой начальной площадки контакта $a_0 \neq 0$

1. Систему двух уравнений относительно двух неизвестных k_w, m в случае $a_0 \neq 0$ получим, выбрав две точки на зависимости $a(s)$: (a_1, s_1) ; (a_2, s_2) и записав решение (4.0) для этих точек:

$$\left. \begin{aligned} a_1^{2m+2} - a_0^{2m+2} &= (2m+2)(Q/\pi)^m k_w RS_1; \\ a_2^{2m+2} - a_0^{2m+2} &= (2m+2)(Q/\pi)^m k_w RS_2. \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

2. Решение этой системы получим, взяв отношение уравнений:

$$\frac{a_1^{2m+2} - a_0^{2m+2}}{a_2^{2m+2} - a_0^{2m+2}} = \frac{S_1}{S_2}, \quad (4.10)$$

или

$$\frac{(a_1/a_0)^{2m+2} - 1}{(a_2/a_0)^{2m+2} - 1} = \frac{S_1}{S_2}. \quad (4.11)$$

3. Второй параметр k_w из первого уравнения (4.9):

$$k_w = \frac{a_1^{2m+2} - a_0^{2m+2}}{(2m+2)(Q/\pi)^m RS}, \quad (4.12)$$

4. Нелинейное уравнение (4.11) можно решать численно, итерационным методом при этом первое приближение можно найти по зависимости следующих из приближенных соотношений:

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d}; \quad \frac{a+1}{b+1} = \frac{c+1}{a+1}. \quad (4.13)$$

Это соотношение, полученное из (4.11) имеет вид:

$$2m+2 = \frac{\lg(S_1+1)/(S_2+1)}{\lg(a_1/a_0)/(a_2/a_0)}, \quad (4.14)$$

или
$$(m)_{(1)} = \frac{\lg(S_1+1)/(S_2+1)}{2\lg(a_1/a_0)/(a_2/a_0)} - 1. \quad (4.15)$$

1.5. Некоторые дополнения к решениям

1.5.1. Испытания на износ с измерением износа сферической поверхности по нормам

Изменения в форме решения прямой задачи. В некоторых случаях с целью автоматизации испытаний измеряется не размер площадки контакта $a(s)$, а величина изменений размера образца по нормам изнашиваемой поверхности $u_w(s)$.

С целью использования результатов испытаний для определения параметров k_w, m модели изнашивания проведем преобразование формул определения k_w, m через $a(s)$ к формулам для определения k_w, m через $u_w(s)$:

1) из формулы (2.5):

$$w(s) = \frac{a^2(s)}{2R} \quad (5.1)$$

находим

$$a(s) = (2Rw(s))^{1/2}; \quad (5.2)$$

2) подставляя формулу (5.1) в (3.13) и (4.0), получаем зависимости для определения износа сферических образцов, при заданных параметрах модели изнашивания.

1.5.2. Изменения в форме формул решения обратной задачи

1) подставляя (5.1) в (4.1), получаем степенную аппроксимацию зависимости износа по нормам осей пути трения S и параметров c, β в формуле:

$$w(s) = (cs^\beta)^{1/2}; \quad (5.3)$$

2) поставляя (5.2) в (4.3), получаем формулы для определения параметров степенной аппроксимации при этом:

$$a_1 = (2Rw_1(s))^{1/2}; \quad a_2 = (2Rw_2(s))^{1/2}, \quad (5.4)$$

или
$$\beta = \frac{\lg\left(\frac{2Rw_1(s)}{2Rw_2(s)}\right)^{1/2}}{\lg S_1/S_2} = \frac{\lg(w_1(S)/w_2(S))^{1/2}}{\lg S_1/S_2}, \quad (5.5)$$

$$c = \frac{(2Rw_1(S))^{1/2}}{S_1\beta}; \quad (5.6)$$

3) далее для случая нулевой площадки контакта параметра модели изнашивания определяются по тем же формулам (3.11), (4.7);

4) для случая ненулевой площадки контакта в (4.11), (4.12) необходимо заменить a_1, a_2, a_0 с учетом (5.4).

1.5.3. Методика сравнения износа разных пар трения

1) пусть выполнены испытания двух разных пар трения 1 и 2 и определены для каждой пары модели изнашивания:

$$(k_{w_1}, m_1) \text{ и } (k_{w_2}, m_2); \quad (5.7)$$

- 2) сравнения износа двух пар трения выполним при одном и том же давлении, соответствующем давлению рассматриваемого узла трения в эксплуатации;
 3) интегрирование модели изнашивания (2.1) при постоянном давлении $\sigma = \text{const}$:

$$\frac{du_w(s)}{ds} = k_w \sigma^m S, \quad (5.8)$$

дает алгебраическую форму модели изнашивания:

$$u_w = k_w \sigma^m S; \quad (5.9)$$

- 4) запишем износ каждой пары трения при постоянном давлении с учетом параметров (5.7) при одинаковых путях трения $S_1 = S_2 = S$:

$$\left. \begin{aligned} u_{w1} &= k_{w1} \sigma^{m1} S; \\ u_{w2} &= k_{w2} \sigma^{m2} S; \end{aligned} \right\} \quad (5.10)$$

- 5) разделив одно уравнение на другое, получаем коэффициент сравнения износа двух пар трения $k_w^{1,2}$

$$\varepsilon_{w1,2} = \frac{k_{w1}}{k_{w2}} \sigma^{m1-m2}; \quad (5.11)$$

- 6) возможно также сравнения износа двух пар трения при разных давлениях S_1, S_2 и путях трения S_1, S_2 по зависимости (5.10):

$$\varepsilon_w \frac{u_{w1}}{u_{w2}} = \frac{k_{w1}}{k_{w2}} \frac{\sigma_1^{m1} S_1}{\sigma_2^{m2} S_2}. \quad (5.12)$$

Часть 2. Практическое применение

2. Испытания на износ по схеме шар - плоскость, износ шара

Задача и цель работы: путем испытания двух пар трения выполнить количественные сравнения их износа при использовании модели изнашивания в дифференциальной форме:

$$\frac{du_w}{ds} = k_w \cdot \sigma^m, \quad (1)$$

или в интегральной форме:

$$U_w = K_w \sigma^m S, \quad (2)$$

где U_w – износ;

S – путь трения;

σ – давление;

u_w, m – параметры модели изнашивания.

2.1. Теория эксперимента

2.1.1. Схема испытаний – шар R неподвижен, плоскость 2 движется (вращается диск).

Шар 1 радиуса R прижимается силой Q к плоскости 2 и скользит в направлении x , изнашиваясь на величину u_w по круговой площадке диаметром $2a$ или радиусом a ;

- 2) по результатам испытаний на первом этапе определяется экспериментальная зависимость площадки контакта $a(s)$ от пути трения S ;

- 3) экспериментальная зависимость $a(s)$ аппроксимируется степенной функцией вида:

$$a(s) = c \cdot S^\beta; \quad (2)$$

- 4) определение пути трения:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot R_g \cdot n \cdot t; \quad (3)$$

где R_g – радиус дорожки трения;

n – число оборотов диска, (об/мин);

t – продолжительность испытаний;

- 5) параметры β, c функции (2) можно приближенно определить по двум экспериментальным точкам: (a_1, S_1) ; (a_2, S_2) :

С помощью формул:

$$\beta = \frac{\lg(a_1/a_2)}{\lg(S_1/S_2)}; \quad (4)$$

$$c = \frac{a_1}{S_1^\beta}; \quad (5)$$

более точно β и c можно определить методом наименьших квадратов МНК, например по программе EXCEL.

2.1.2. Основные расчетные формулы

1) определение параметров модели изнашивания, в соответствии с разделом 5:

$$m = \frac{1 - 2\beta}{2\beta}; \quad (6)$$

$$K_w = \frac{c^{2m+2}}{(2m+2) \cdot R \cdot (Q/\pi)^m}; \quad (7)$$

2) определение давления σ при заданном раз мере a площадки контакта:

$$\sigma = \frac{Q}{\pi \cdot a^2}; \quad (8)$$

3) сравнение износа двух пар трения при известных значениях K_{w1}, m_1, K_{w2}, m_2 при разных $S_1, S_2, \sigma_1, \sigma_2$:

$$\frac{U_{w1}}{U_{w2}} = \frac{K_{w1} \cdot \sigma_1^{m_1} \cdot S_1}{K_{w2} \cdot \sigma_2^{m_2} \cdot S_2}. \quad (9)$$

При $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma, S_1 = S_2$:

$$\frac{U_{w1}}{U_{w2}} = \frac{K_{w1}}{K_{w2}} \cdot \sigma^{m_1 - m_2}. \quad (10)$$

2.2. Техника эксперимента

2.2.1. Испытания на износ могут выполняться на универсальной установке типа МУ-1

2.2.2. Порядок испытаний

2.2.2.1. Исходные данные:

1) Q кг, нагрузка на контакт, с учетом передаточного отношения рычага и показаний динамометра;

2) n , об/мин – число оборотов диска;

3) R_g – радиус дорожки трения на диске;

4) $R = R_w$ – радиус поверхности сферического образца;

5) материал образца и диска;

6) наличие или отсутствие смазки;

7) температура окружающей среды.

2.2.2.2. Последовательность испытаний

1) задаться исходными данными;

2) выбрать интервалы испытаний;

3) после каждого интервала испытаний измерить величину площадки $2a$;

4) результаты испытаний определить в виде таблицы и в виде графика;

5) после завершения испытаний выполнить расчет $\beta, c, m, K_w, \epsilon, \sigma$ по формулам п.п. 1.1, 1.2.

2.3. Реализация эксперимента

2.3.1. Исходные данные

1) задача – сравнить износ композита при трении по стали без смазки и со смазкой солидоллом;

2) $R_g = 70$ мм;

3) $R = R_w = 5$ мм;

4) нагрузка грузов на рычаг $Q_{gp} = 0,28$ кг;

5) нагрузка на образце $Q = Q_{gp} \cdot i = 0,28 \cdot \frac{145}{45} = 0,9$ кг;

6) $n = 90$ об/мин;

7) путь трения за пять минут испытаний:

$$S_1 = 2 \cdot \pi \cdot R_g \cdot n \cdot t = 2 \cdot \pi \cdot 70 \cdot 92 \cdot 5 = 20,2 \cdot 10^5 \approx 2 \cdot 10^5 \text{ мм}$$

2.3.2. Результаты испытаний представляем в табл. 1

Таблица 1

Без смазки						Со смазкой			
W, н/п	t, мин	S·10 ⁵ , мм	2a, мм	a, мм	F _{мп} , кг	S·10 ⁵ , мм	2a, мм	a, мм	F _{мп} , кг
1	5	2,02	1,8	0,9	0,41 0,45	2	1,1	0,55	0,13 0,17
2	10	4,05	2,0	1,0	0,57 0,5	4	1,4	0,7	0,09 0,15
3	15	6,06	2,7	1,35	0,55 0,43	6	2,0	1,0	0,12 0,16
4	20	8,08	3,1	1,55	0,5 0,42	8	2,3	1,15	0,08 0,17

2.3.3. Обработка результатов испытаний

Обозн. велич.	Размерность	Формулы и расчеты	Результат расчета	№ формулы
Композит – сталь без смазки				
базовые точки		$a_1 = 0,9$ мм; $S_1 = 2 \cdot 10^5$ мм $a_2 = 1,5$ мм; $S_2 = 8 \cdot 10^5$ мм	-	-
β	-	$\beta = \frac{\lg \frac{a_1}{a_2}}{\lg \frac{S_1}{S_2}} = \frac{\lg \frac{0,9}{1,5}}{\lg \frac{2}{8}} = \frac{0,222}{0,6}$	0,37	(3)
c	$\frac{\text{мм}}{\text{мм}^\beta}$	$c = \frac{a_1}{S_1^\beta} = \frac{0,9}{(2 \cdot 10^5)^{0,37}} = \frac{0,9}{91}$	0,01	(4)
m	-	$m = \frac{1 - 2\beta}{2\beta} = \frac{1 - 2 \cdot 0,37}{0,74} = \frac{0,26}{0,74}$	0,35	(5)
K_w	$\left(\frac{\text{мм}}{\text{кг}}\right)^m$	$K_w = \frac{c^{2m+2}}{(2m+2) \cdot \left(\frac{Q}{\pi}\right)^m \cdot R} = \frac{0,01^{2,7}}{2,7 \cdot 3,33^{0,35} \cdot 5}$	$0,2 \cdot 10^{-6}$	(6)
σ	$\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	$\sigma(a_1) = \frac{Q}{\pi \cdot a_1^2} = \frac{3,33}{\pi \cdot 0,9^2}$, $\sigma(a_2) = \frac{3,33}{\pi \cdot 1,5^2}$	1,31 0,47	(7)
Композит – сталь смазка солидол				
базовые точки		$a_1 = 0,6$ мм; $S_1 = 2 \cdot 10^5$ мм $a_2 = 1,15$ мм; $S_2 = 8 \cdot 10^5$ мм	-	-
β	-	$\beta = \frac{\lg \frac{0,6}{1,15}}{\lg \frac{2}{8}} = \frac{0,28}{0,6}$	0,47	(3)
c	$\frac{\text{мм}}{\text{мм}^\beta}$	$c = \frac{0,6}{(2 \cdot 10^5)^{0,47}} = \frac{0,6}{448}$	0,0013	(4)
m	-	$c = \frac{1 - 2 \cdot 0,47}{0,94} = \frac{0,06}{0,94}$	0,064	(5)
K_w	$\left(\frac{\text{мм}}{\text{кг}}\right)^m$	$K_w = \frac{0,0013^{2,128}}{2,128 \cdot 3,33^{0,064} \cdot 5}$	$0,2 \cdot 10^{-7}$	(6)
σ	$\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	$\sigma(a_1) = \frac{3,33}{\pi \cdot 0,6^2}$, $\sigma(a_2) = \frac{3,33}{\pi \cdot 1,15^2}$	2,94 0,8	(7)
Сравнение износа без смазки и со смазкой				
ε	-	$\varepsilon = \frac{K_{w1}}{K_{w2}} = \frac{0,2 \cdot 10^{-6}}{0,2 \cdot 10^{-6}}$	10	(9)

Смазка контакта – уменьшается износ в 10 раз.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое модель изнашивания.
2. Чем параметры модели K_w, m отличаются от факторов σ, S модели изнашивания.
3. Что такое параметры аппроксимирующей степенной функции β, c и как они определяются.
4. Как производится сравнение износа пар трения с помощью модели изнашивания.
5. Почему будет неточным сравнения износа пар трения по площадке износа.

3. Испытание на износ по схеме шар-плоскость (износ плоскости)

Задача: 1. Выполняются испытания на изнашиваемой плоской поверхности не изнашиваемым шаром. 2. Результаты испытаний оформляются в виде зависимости ширины дорожки износа от пути трения. 3. Определяются параметры u_w, m модели изнашивания. 4. С целью количественного сравнения износа разных пар трения (например, со смазкой и без смазки).

3.1. Теория эксперимента:*3.1.1. Расчетная схема, допущения, условия работы*

Схема контакта: вал радиуса R прижимается к плоскости силой Q , вращается, изнашивается только плоскость на величину u_w :

1) жесткий неизнашиваемый шар радиуса R при силе Q по жесткой изнашиваемой плоскости шириной $2a(S)$; U_w – глубина желоба, это максимальный износ плоскости;

2) плоскость изнашивается по модели:

$$\frac{dU_w}{dS} = K_w \sigma^m, \quad (1)$$

где k_w, m – параметры модели изнашивание;

3) теоретическое решение задачи [1]. При допущении: износ малой площадки контакта, круговая с радиусом $r = a$;

3.1.2. Форма представлена результатов испытания

1) При решении принято, что из эксперимента найдена зависимость размера дорожки износа, a от пути трения $a(S)$ в виде степенной функции:

$$a(S) = CS^\beta; \quad (2)$$

2) Здесь путь трения S определяется для шара; в решении зависимости пути трения для плоскости и шара;

3) По графику $a(S)$ выбираются две точки:

$$(a_1, s_1); (a_2, s_2); \quad (3)$$

4) параметры C, β степенной аппроксимации определяется по формуле:

$$\beta = \frac{\lg(a_2 / a_1)}{\lg(s_2 / s_1)}, \quad (4)$$

$$C = \frac{a_1}{s_1^\beta}. \quad (5)$$

3.1.3. Формулы для определения параметров k_w, m модели изнашивания:

1) параметр m :

$$m = \frac{1-\beta}{2\beta}; \quad (6)$$

2) параметр k_w :

$$K_w = \frac{a_1^{2m+1}}{(2m+2)S_1 C_1 (Q/\pi)^M R}; \quad (7)$$

$$S_1 C_1 = 2N.$$

3.1.4. Сравнение износа разных пар трения при износе плоскости:

1) проводится по зависимости:

$$\varepsilon = \frac{U_{w1}}{U_{w2}} = \frac{K_{w1} \sigma_1^{m1} S_1}{K_{w1} \sigma_2^{m2} S_2}; \quad (8)$$

2) или в одинаковых условиях $\sigma_1 = \sigma_2, S_1 = S_2$:

$$\varepsilon = \frac{K_{w1}}{K_{w1}} - \sigma^{m1-m2}; \quad (9)$$

3) давление определяются по зависимости:

$$\sigma = \frac{Q}{\pi a^2}; \quad (10)$$

выражение (7). С учетом соотношений:

$$C = \frac{2}{S_1} = \frac{2}{2\pi R_g}; \quad S_1 = 2\pi R_g n t; \quad (11)$$

$$S_1 C_1 = \frac{22\pi R_g n t}{2\pi R_g} = 2n t = 2N; \quad (12)$$

$$K_w = \frac{a_1^{2m+1}}{(2m+2)2N(Q/\pi)^m R}; \quad (13)$$

$$N = n t .$$

3.2. Техника эксперимента**3.2.1. Оборудование**

1) испытания могут проводиться на любой установке, обеспечивающей скольжение шара по плоскости;

2) шар должен быть не изнашиваемым, а плоскость изнашиваемой.

3) износ (размер дорожки изнашивания) измеряется с помощью измерительного микроскопа.

3.2.2. Условия испытания фиксируем не в начале контакта:1) нагрузка $Q_{из}$ на сопряжение;2) число оборотов диска n , об/мин;3) радиус дорожки скольжения R_g , мм;

4) материал шара; для двух вариантов трения;

5) материал плоскости; для двух вариантов трения;

6) вид смазки;

7) температура окружающей среды.

3.2.3. Представление результатов:

В форме таблицы вида:

№	I вариант трения				II вариант трения			
	t , мин	S , мм	$2a$, мм.	a , мм	t , мин	S , мм	$2a$, мм	a , мм

3.2.4. Порядок обработки результатов испытания:1) определяется параметр аппроксимация функции $a(S)$, по (3), (4);2) определяется параметр модели изнашивания k_w, m по (6),(7);

3) выполняется сравнение вариантов пар трения по износу по (8), (9).

3.3. Реализация эксперимента

Задача: сравнить износ плоскости из данного материала с шаром из стали ШХ15 без смазки и со смазкой.

3.3.1. Условия испытаний и исходные данные:

- 1) установка испытаний УМ-1, описание см. п 6.1;
- 2) материал шарика ШХ15, материал плоскости винипласт низкого давления;
- 3) радиус шарика $R_{ш} = 5$ мм;
- 4) нагрузка на контакте $Q = 4,2 \text{ кГ}$;
- 6) $n = 92$ об/мин;
- 7) $R = 50$ мм, радиус дорожки трения на диске;

3.3.2. Результат испытания

Таблица 1

N	t, мин	Без смазки					Со смазкой				
		$S \cdot 10^5$ мм	2a, мм	a, мм	F_{mp}	F/Q	t, мин	F	2a, мм	a, мм	
276	3	0,9	1,1	0,505	0,13 0,23	0,03 0,05	0,012 0,04	0,05 0,17	0,7	0,35	
552	6	1,8	2,05	1,02	0,19 0,24	0,05 0,06	0,02 0,03	0,08 0,13	1,4	0,7	
1104	12	3,6	2,2	1,1	0,22 0,29	0,05 0,07	0,02 0,03	0,09 0,14	2,0	1,0	

3.3.3. Обработка результатов испытаний

3.3.3.1. Обработка результатов испытания (без смазки)

1) расчет пути трения за 1 минуту:

$$S(1) = 2\pi R_g n \cdot 1 = 2\pi \cdot 50 \cdot 92 \cdot 1 = 3 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

$$S(3) = 9 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

$$S(6) = 18 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

$$S(12) = 36 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

2) степенная аппроксимация функции $a(S)$, случай без смазки (2.1) базовые точки:

$$a_1 = 0,51 \text{ мм}; \quad S_1 = 0,9 \cdot 10^5;$$

$$a_2 = 1,1 \text{ мм}; \quad S_2 = 3,6 \cdot 10^5;$$

параметры аппроксимации кривой по (5), (6):

$$\beta = \frac{\lg a_1 / a_2}{\lg S_1 / S_2} = \frac{\lg 0,51 / 1,1}{\lg 0,9 / 3,6} = \frac{0,33}{0,6} = 0,55;$$

$$C = \frac{a_1}{S_1^\beta} = \frac{0,51}{(0,9 \cdot 10^5)^{0,55}} = \frac{0,51}{531} = 9,6 \cdot 10^{-4};$$

3) параметры K_w, m модели изнашивания по (6), (7):

$$m = \frac{1-\beta}{2\beta} = \frac{1-0,55}{1,1} = 0,41;$$

$$K_w = \frac{a_1^{2m+1}}{(2m+2)S_1 C_1 (Q/\pi)^m R};$$

$$K_w = \frac{a_1^{2m+1}}{(2m+2)2N(Q/\pi)^m R}; N = nt;$$

$$K_w = \frac{0,51^{1,82}}{282 \cdot 2 \cdot 276 (4,2/\pi)^{0,41} \cdot 5} = 3,4 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\text{МИН}}{\text{КГ}} \right)^m;$$

$$K_w = 3,4 \cdot 10^{-4}.$$

3.3.2. Обработка результатов испытания (со смазкой)

1) базовые точки:

$$a_1 = 0,35 \text{ мм}^5; \quad S_1 = 0,9 \cdot 10^5;$$

$$a_2 = 1,0 \text{ мм}; \quad S_2 = 3,6 \cdot 10^5;$$

2) параметры степенной функции $a(S) = CS^\beta$:

$$\beta = \frac{\lg a_1 / a_2}{\lg S_1 / S_2} = \frac{\lg (0,35 / 1,0)}{\lg (1 / 3,6)} = \frac{0,45}{0,56} = 0,8;$$

$$c = \frac{0,35}{(0,9 \cdot 10^5)^{0,8}} = \frac{0,35}{9 \cdot 10^3} = 0,04 \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 10^{-4};$$

3) параметры модели:

$$m = \frac{1-\beta}{2\beta} = \frac{1-0,8}{1,6} = 0,125;$$

$$K_w = \frac{a_1^{2m+1}}{(2m+2)2N(Q/\pi)^m R}; \quad N = nt;$$

$$K_w = \frac{0,35^{3,5}}{4,5(4,2/\pi)^{0,125} \cdot 552,5}, \quad K_w = \frac{0,025}{1,3 \cdot 10^4} = 0,02 \cdot 10^{-4}, \text{ (мм}^2/\text{кг)}^m;$$

4) сравнения износа при $\sigma = \frac{4,2}{\pi \cdot 0,35^2} = 10,9$, кг/см²:

$$\frac{U_{w1}}{U_{w2}} = \frac{K_{w1}}{K_{w2}} \cdot \sigma^{m_1 - m_2} = \frac{3,4}{0,025} (10,9)^{(0,41-0,125)} = 136 \cdot 2 \approx 200.$$

Выводы

1. Разработана и предлагается для использования новая концепция теоретической и экспериментальной трибологии. Содержание концепции изложено в 11 монографиях [1 - 11].

Сущность концепции состоит в активном использовании и развитии методов контактной механики на всех этапах процесса повышения износостойкости и надежности узлов трения.

Ядром реализации новой концепции является метод переменной площадки контакта при испытаниях на износ (МПП k) с определением параметров модели изнашивания k_w, m сокращенно МПП k_w, m . По результатам испытаний можно судить о количественных соотношениях между износом разных пар трения.

С подробностями концепции можно ознакомиться на сайте: "Новые знания в трибологии" new-tribology.abra.ru.

2. В основе изложено теории метода переменной площадки контакта (МПП k) с определением параметров k_w, m модели изнашивания лежит дифференциальное уравнение процесса изнашивания с использованием двухфакторной σ, S (давление путь трения) двухпараметрической u_w, m метода изнашивания.

Определение параметров k_w, m модели строиться на решении прямой и обратной задач для дифференциального уравнения процесса изнашивания.

3. Главными достоинствами МПП k_w, m является: 1) возможность эффективно определять параметры модели изнашивания при испытаниях на износ образцов кривизны с измерением размеров площадок износа. 2) другое базовое преимущество метода состоит в резком уменьшении массы и размеров установок, на которых можно реализовать метод.

Литература

1. Internet сайт Новые знания в трибологии: new-tribology.abra.ru
2. Кузьменко А.Г. Прикладная теория методов испытаний на износ. – Хмельницкий: ХНУ, 2007. – 579 с.

Поступила в редакцию 18.02.2014

Kuzmenko A.G. Methods of test for wear at the contact area with the variable definition parameters k_w, m , models wear (WFP), k_w, m .

Sets out the theory and practice of the test method for wear: 1) at variable contact area and 2) with definiteness of the model parameters of wear. The information on the new system of knowledge (concepts) based on the contact mechanics of interfaces and new methods of tribological tests.

Key words: test method for wear, variable contact area, the model wear.

References

1. Internet sajt Novye znaniya v tribologii: new-tribology.abra.ru
2. Kuz'menko A.G. Prikladnaja teoriija metodov ispitaniy na iznos. Hmel'nickij: HNU, 2007. 579 s.