

**Кузьменко А.Г.**

Хмельницкий национальный университет,  
г. Хмельницкий, Украина

**КОНКУР-ПРОЦЕССЫ ИЗНАШИВАНИЯ  
И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
УЗЛА ТРЕНИЯ. ЧАСТЬ I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ  
ОСНОВЫ ОБОБЩЕННОГО МЕТОДА ИСПЫ-  
ТАНИЙ НА ИЗНОС  
ПО ЧЕТЫРЕХШАРИКОВОЙ СХЕМЕ**

Содержание

1. Введение, понятие о конкур-процессах в трибологии
  2. Модифицированный обобщенный метод испытаний на износ по четырехшариковой схеме
    - 2.1. Краткая теория испытаний по схеме шар-плоскость при нулевой начальной площадке  
 $a_0 = 0$
    - 2.2. Теория испытаний на износ по схеме шар-плоскость при ненулевой начальной площадке  
контакта  $a(s = 0) = a_0 \neq 0$
    - 2.3. Решение обратной задачи при  $a_0 \neq 0$
  3. Теория испытаний на износ по четырехшариковой схеме
    - 3.1. Схема испытаний и общие соотношения
    - 3.2. Метод подобия и приведенного радиуса в теории испытаний на износ по схеме ЧШМ
  4. Физико-статистическая безразмерная модель и критерий подобия процесса изнашивания
    - 4.1. Безразмерные комплексы модели и критериальное уравнение процесса изнашивания
    - 4.2. Определение параметров безразмерных моделей и критериальных уравнений
    - 4.3. Вероятность модели изнашивания
    - 4.4. Вероятностные основы гипотезы модели схватывания
    - 4.5. Определение вероятности схватывания меди со сталью
  5. Практическая реализация ФСК при испытаниях на ЧШМ
    - 5.1. Условия проведения испытаний и основные результаты
    - 5.2. Определение параметров  $k_w, m$  до начала схватывания (одномерная размерная модель изнашивания (2.2.1))
    - 5.3. Определение текущего и предельного значений критерия подобия при схватывании
    - 5.4. Определение вероятности схватывания в точке  $a_1, S_1$  для случая смазка SAE 10/95 + Cu:
- Выводы по части I работы  
Литература

**1. Введение. Понятие о конкур-процессах изнашивания и восстановления поверхностей**

1<sup>0</sup>. Общие понятия определение  $k$  - процессов среди множества процессов, протекающих в материальных системах, в частности в трибологии, выведем такие процессы, внутри которых можно выделить две подсистемы, которые непрерывно противостоят друг другу как бы добиваясь своих целей, иначе говоря, эти системы конкурируют друг с другом.

Процессы в таких системах далее будем называть конкур-процессами или  $k$  - процессами.

В трибологии под  $k$  - процессами будем понимать одновременное протекание двух процессов, действующих на контактирующие поверхности с противоположным эффектом: 1) изнашивания или разрушения поверхности; 2) восстановления или планирования поверхности.

2<sup>0</sup>. Виды конкур-процессов в трибологии. В трибологии наиболее известны и изучены три вида  $k$  - процессов:

I – вид  $k$  - процессов – это износ изнашивания и восстановление поверхностей по схеме избирательного перекося или при реализации трибологического эффекта безизносности Гаркунова.

II – вид  $k$  - процессов – имеет место при окислительном износе; при окислительном изнашивании по Костецкому: одновременно или параллельно идут два процесса: 1) окисления (по существу восстановления поверхности); 2) процесс разрушения и удаления окисной пленки по существу процесс изнашивания поверхности.

III – вид  $k$  - процесса, который вводится и детально исследуется в данной работе, это процесс изнашивания и восстановления поверхности порошком мягкого металла (медь, бронза) из смазки по механизму планирования.

В процессе исследований оказалось, что изучение этого третьего вида  $k$  - процесса в настоящее время является наиболее актуальным: от назначения закономерностей этого процесса зависят успехи в разработке технологии непрерывного восстановления изношенной поверхности порошками мягких металлов из смазки. В связи с этим изучению этого III-вида  $k$  - процесса уделяется здесь основное внимание.

3<sup>0</sup>. Типы  $k$  - процессов для III вида  $k$  - процессов предложено рассматривать четыре типа графиков зависимости износа (или размера  $a$  площадки контакта) от пути трения для испытаний при разных смазках и присадках.

Графики строятся следующим образом:

1) выполняются испытания на износ пары трения при выбранной базовой смазке 1; строится график зависимости  $a(s)1$ ;

2) выполняются испытания на износ пары трения измененной опытной смазке 2; при этом также строится график зависимости размера площадки контакта от пути трения  $a(s)2$ ;

3) оба графика наносятся на один рисунок и сопоставляются. Взаимное расположение графиков несет информацию о характере протекающих конкурентных процессов изнашивания и восстановления поверхностей;

4) в связи с этим предлагается рассматривать три типа  $k$  - процессов III вида;

III - 1 первый тип  $k$  - процесса III вида характеризуется следующими особенностями: график  $a(s)1$  на всем интервале испытаний выше графика  $a(s)2$ , то есть износ при модифицированной смазке или присадке везде ниже износа при базовой смазке на рис. 1.1.

III - 2 во втором типе  $k$  - процесса III вида график зависимости  $a(s)1$  на всем интервале испытаний располагается ниже графика  $a(s)2$ , то есть модификация смазки не дает уменьшения износа во всем диапазоне испытаний на рис. 1.2.

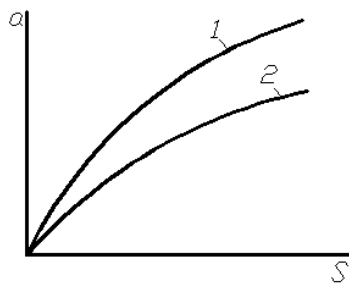


Рис. 1.1 – Графики зависимостей  $a(s)1$  и  $a(s)2$  для  $k$ -процессов типа III-1

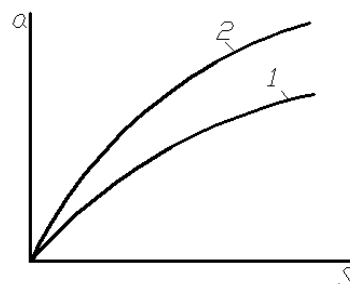


Рис. 1.2 – Графики зависимостей  $a(s)1$  и  $a(s)2$  для  $k$ -процессов типа III-2

III - 3 в третьем типе  $k$  - процесса III вида: 1) на первом этапе испытаний при  $s_1 < s < 0$ .  $a(s)1 > a(s)2$ , а на втором этапе после точки  $s_1$   $a(s)1 < a(s)2$  на рис. 1.3.

III - 4 в четвертом типе  $k$  - процесса III вида: 1) на первом этапе на рис. 1.4.

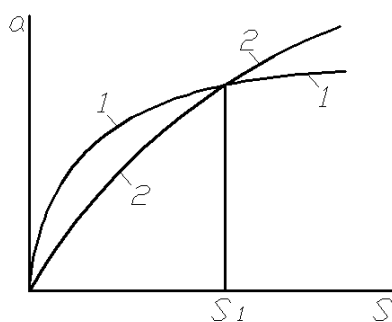


Рис. 1.3 – Графики зависимостей  $a(s)1$  и  $a(s)2$  для  $k$ -процессов типа III-3

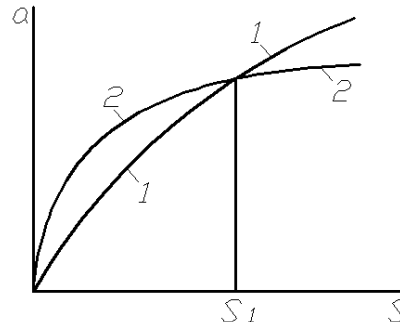


Рис. 1.4 – Графики зависимостей  $a(s)1$  и  $a(s)2$  для  $k$ -процессов типа III-4

Интерпретация или содержание или смысл, который несут графики разных типов. Приведены при испытаниях в п. 5 для  $k$  - процесса типа II I- 4; для  $k$  - процесса типа III - 1 в п. 6.

4<sup>0</sup>. К четвертому виду (IV)  $k$  - процессов в трибологии можно отнести процессы изнашивания и восстановления смазки или смазочного слоя. При работе любого смазываемого сопряжения смазка удаляется, а затем с помощью смазочной системы восстанавливается. Для жидкой смазки это система насос трубы, фильтра. Для пластической смазки это, как правило, пресс-масленки.

В связи с рассматриваемым здесь  $k$  - процессами в подшипниках качения становится ясным, что для IV вида  $k$  - процессов в случае пластической смазки центральной задачи становится задачи непрерывного автоматического восстановления пластической смазки в подшипниках качения.

5<sup>0</sup>. Процессы повреждаемости элементов машин в процессе эксплуатации и ремонта машин, как правило. С уменьшением их надежности также укрупнено можно рассматривать как реализацию контур-процессов в «большом».

В данной работе дана практическая реализация метода исследований  $k$  - процессов III вида, типов 1 и 4 в п. 6 и п. 5 данной работы.

### **Часть I. Теоретические основы обобщенного метода испытаний на износ по четырехшариковой схеме**

Цель этой работы определить условия и эффективность смазки с порошком меди при износе стали ШХ15. Исследования выполняются по четырехшариковой схеме с использованием размерной и безразмерной моделей изнашивания.

В известных методах испытания на износ по четырехшариковой схеме ГОСТ 9094-75, ГОСТ 23.221-84, ASTM D 2266, DIN 51350/3 и др., при оценке износостойкости измеряется размер пятна контакта при износе в заданных условиях. Износостойкость определяется как отношение размеров площадки износа исследуемого варианта к базовому:

1) существу это не количественный, а качественный метод оценки износостойкости, так как одной и той же площадке могут соответствовать разная износостойкость;

2) главный недостаток этого метода состоит в отсутствии обоснованной методики перенесения результатов лабораторных испытаний на оценку износа разных узлов трения;

3) испытания проводятся на поверхностях из стали ШХ15, а перенос результатов на другие материалы отсутствует.

В данной работе предлагается метод испытания четырехшариковой схеме с построением размерных и безразмерных моделей изнашивания, которые позволяют количественно оценивать эффективность мероприятий по повышению износостойкости с перенесением этих результатов на другие условия работы и на натурные узлы трения.

### **2. Модифицированный обобщенный метод испытаний на износ по четырех шариковой схеме**

**Введение.** Теория методов испытаний на износ с определением параметров моделей изнашивания, детально разработанная в монографии [7] основана на использовании закономерностей изнашивания поверхностей с изменяющейся площадкой контакта (шар, цилиндр, конус и т.д.). Идея метода и его эффективность применительно к износу шара на плоскости были показаны в работе [5].

Использование результатов этой работы применительно к износу шаров в четырехшариковой машине было показано в работе [1]. В дальнейшем это решение вошло в монографии [2, 3, 4, 7] по контактной механике и износу смазанных поверхностей.

В работе детально рассмотрен наиболее общий случай, когда одновременно изнашиваются все четыре шара. На основе решения, как прямой, так и обратной задач получены расчетные зависимости, которые позволяют по данным экспериментов на ЧШМТ определять параметры моделей изнашивания, как неподвижных шаров, так и вращающегося шара.

#### **2.1. Краткая теория испытаний по схеме шар-плоскость при нулевой начальной площадке $a_0 = 0$ , износ неподвижных шаров**

1<sup>0</sup>. **Постановка задачи.** Ставится задача по результатам испытаний на износ шара радиуса  $R$  на плоскости определить параметры модели изнашивания:

1) в качестве размерной дифференциальной модели изнашивания принимаем соотношение вида

$$\frac{du_w}{ds} = k_w \sigma^m, \quad (2.1.1)$$

где  $u_w$  - износ;

$S$  – путь трения;  
 $\sigma$  – давление по площадке изнашивания;  
 $k_w, m$  – параметры модели;

2) при допущении о равномерном распределении контактного давления в любой момент процесса условие равновесия можно записать в виде:

$$Q = \pi a^2 \sigma, \quad (2.1.2)$$

где  $a$  – радиус площадки контакта;  
 $Q$  – полная нагрузка действующая постоянно на шар;

3) из геометрических соотношений условие сплошности в контакте с точностью до малых первого порядка имеет вид:

$$u_w = u = a^2 / 2R, \quad (2.1.3)$$

$u_w$  – максимальный износ равен стреле пробегу сферического сегмента.

4) будем полагать, что при  $a(s=0) = a_0 = 0$ , из эксперимента известна степенная зависимость радиуса круговой площадки контакта от пути трения:

$$a(s) = cs^\beta, \quad (2.1.4)$$

где  $S$  – путь трения для точек шара;

$c, S$  – параметры степенной аппроксимации экспериментальных данных, которые могут быть определены методом наименьших квадратов, либо, приближенно, по двум экспериментальным точкам  $(a_1, s_1), (a_2, s_2)$ :

$$\beta = \frac{\lg a_1 / a_2}{\lg s_1 / s_2}, \quad c = \frac{a_1}{s_1^\beta}. \quad (2.1.5)$$

Соотношениями (2.1.1) – (2.1.5) завершается математическая постановка задачи.

2<sup>0</sup>. Решение обратной задачи для случая  $a_0 = 0$ :

1) интегрируя (2.1.1), получаем интегральную форму модели изнашивания:

$$u_w = k_w \int_0^s \sigma^m(s) ds; \quad (2.1.6)$$

2) подставляя (2.1.3) и (2.1.2) в (2.1.6), имеем:

$$\frac{a^2}{2R} = k_w \int_0^s \frac{Q}{\pi a^2} ds; \quad (2.1.7)$$

3) далее подставляем экспериментальную функцию  $a(s)$  по (2.1.4) в (2.1.7):

$$\frac{c^2 s^{2\beta}}{2R} = k_w \int_0^s \frac{(Q/\pi)^m}{c^{2m} s^{2\beta m}} ds; \quad (2.1.8)$$

4) после интегрирования имеем следующее уравнение задачи:

$$\frac{c^2 s^{2\beta}}{2k_w R} = \frac{(Q/\pi)^m}{c^{2m}} \frac{s^{1-2\beta m}}{1-2\beta m}; \quad (2.1.9)$$

5) из условия выполнимости этого уравнения при любых значениях пути трения  $S$  имеем решение:

$$2\beta = 1 - 2\beta m, \quad (2.1.10)$$

отсюда:

$$m = \frac{1 - 2\beta}{2\beta}, \quad (2.1.11)$$

далее из (2.1.9) с учетом (2.1.10) имеем

$$k_w = \frac{c^{2m+2\beta}}{R(Q/\pi)^m}. \quad (2.1.12)$$

Полученные формулы (2.1.11) и (2.1.12) справедливы только для случая нулевой начальной площадки контакта  $a_0 = 0$ .

**2.2. Теория испытаний на износ по семе шар-плоскость при ненулевой начальной площадке контакта  $a(s=0) = a_0 \neq 0$**

1<sup>0</sup>. Постановка прямой задачи

1) пусть для заданной пары трения известны параметры  $k_w, m$  модели изнашивания (2.1.1). Прямая задача состоит в определении износа  $u_w(s, Q, R, k_w, m)$  при заданных условиях эксплуатации;

2) математическая постановка прямой задачи содержит те же соотношения (2.1.1) – (2.1.3) что и обратная задача:

$$\frac{du_w}{ds} = k_w \sigma^m, \quad (2.2.1)$$

$$\sigma = \frac{Q}{\pi a^2}, \quad (2.2.2)$$

$$u_w = a^2 / 2R. \quad (2.2.3)$$

2<sup>0</sup>. Решение прямой задачи:

1) дифференцируя условие сплошности (2.1.3) по  $s_1$  имеем:

$$\frac{du_w}{ds} = \frac{2a(s)}{2R} \frac{da(s)}{ds}; \quad (2.2.4)$$

2) приравнявая (2.2.1) и (2.2.4), получаем:

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

отсюда: 
$$\sigma^m = \frac{a}{k_w R} \frac{da}{ds}; \quad (2.2.5)$$

3) далее приравнявая (2.2.5) и (2.2.2) приходим к дифференциальному уравнению задачи:

$$\frac{Q}{\pi a^2} = \frac{a}{k_w R} \frac{da}{ds}, \quad (2.2.6)$$

или 
$$\frac{Rk_w(Q/\pi)^m}{a^{2m}} = a \frac{da}{ds},$$

$$k_w R(Q/\pi)^m ds = a^{2m+1} da, \quad (2.2.7)$$

это простое обыкновенное дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными;

4) интегрируя дифференциальное уравнение (2.2.7), получаем:

$$\frac{a^{2m+2}}{2m+2} = k_w R(Q/\pi)^m s + c; \quad (2.2.8)$$

5) постоянную интегрирования  $c$  определим из условия:

$$a(s=0) = a_0, \quad (2.2.9)$$

$$c = \frac{a_0^{2m+2}}{2m+2}; \quad (2.2.10)$$

6) подстановка (2.2.10) в (2.2.8) дает окончательно решение в виде:

$$a^{2m+2} = (2m+2)k_w R(Q/\pi)^m s + a_0^{2m+2}; \quad (2.2.11)$$

7) при  $a_0 = 0$  имеем:

$$a^{2m+2} = (2m+2)k_w R(Q/\pi)^m s. \quad (2.2.12)$$

**2.3. Решение обратной задачи при  $a_0 \neq 0$**

1) Для определения двух параметров  $k_w, m$  необходимо иметь два уравнения;

- 2) с этой целью на зависимости  $a(s)$  выберем две точки с координатами  $(a_1, s_1)$ ,  $(a_2, s_2)$ ;  
 3) подставляя выбранные точки в решение (2.2.11), получаем систему двух уравнений:

$$\begin{aligned} a_1^{2m+2} &= (2m+2)k_w R(Q/\pi)^m s_1 + a_0^{2m+2} \\ a_2^{2m+2} &= (2m+2)k_w R(Q/\pi)^m s_2 + a_0^{2m+2} \end{aligned} \quad (2.2.13)$$

- 4) разделив первое уравнение на второе приходим к одному уравнению относительно параметра  $m$ :

$$\frac{a_1^{2m+2} - a_0^{2m+2}}{a_2^{2m+2} - a_0^{2m+2}} = \frac{s_1}{s_2}, \quad (2.2.14)$$

или в более удобной для реализации форме:

$$\frac{(a_1/a_0)^{2m+2} - 1}{(a_2/a_0)^{2m+2} - 1} = \frac{s_1}{s_2}. \quad (2.2.15)$$

Это нелинейное относительно параметра  $m$  уравнение можно решать численно с использованием интегральных процедур.

Формулу для определения параметра  $k_w$  получаем из первого уравнения (2.2.13):

$$k_w = \frac{a_1^{2m+2} - a_0^{2m+2}}{(2m+2)R(Q/\pi)^m s_1}. \quad (2.2.16)$$

### 3. Теория испытаний на износ по четырехшариковой схеме

#### 3.1. Схема испытаний и общие соотношения

1<sup>0</sup>. *Схема*: на трех симметрично расположенных шарах радиуса  $R$  располагается под нагрузкой  $Q$  четвертый вращающийся шар радиуса  $R$ .

1) из геометрии контакта следует [1], что при общей нагрузке  $Q_n$ , нагрузка на один шарик определяется из соотношения:

$$Q = 0,4082Q_n; \quad (3.1.1)$$

2) средний радиус  $r_1$ , на котором расположены пятна износа на каждом из трех шариков равен:

$$r_1 = 0,5774R; \quad (3.2.1)$$

3) путь трения  $S$  на пятне износа нижних шариков равен:

$$s = 2\pi r_1 n t; \quad (3.1.3)$$

4)  $a$  - радиус пятна износа на нижних шарах ЧШМ.

#### 3.2. Метод подобия и приведенного радиуса в теории испытаний на износ по схеме ЧШМ

1<sup>0</sup>. Основные положения метода подобия в контактной механике с износом:

1) на первом этапе выполняется решение контактной задачи для шара на плоскости с износом, это решение выполнено в п. 2 данной работы;

2) на втором этапе на основе общих соотношений выводится формула для приведенного радиуса, для контакта тел двух двоякой кривизны.

3) на третьем этапе в расчетные формулы для контакта с износом шара и плоскости вместо радиуса шара  $R$  подставляется приведенный радиус  $R_*$ ;

4) получаемые при этом формулы и являются формулами для определения параметров модели изнашивания.

2<sup>0</sup>. Общая процедура определения приведенного радиуса для тел двоякой кривизны:

1) приведенный радиус  $R_*$  определяется по соотношениям:

$$R_* = (R_1^* R_2^*), \quad (3.1.4)$$

где

$$\frac{1}{R_1^*} = \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{21}}, \quad (3.1.5)$$

$$\frac{1}{R_2^*} = \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{22}}, \quad (3.1.6)$$

$$R_1^* = \frac{R_{11}R_{21}}{R_{11} + R_{21}}, \quad (3.1.7)$$

$$R_2^* = \frac{R_{12}R_{22}}{R_{12} + R_{22}}; \quad (3.1.8)$$

2) в случае контакта двух шаров одинакового радиуса  $R_1 = R_2$  из (3.1.7) имеем:

$$R_1^* = \frac{R_1 \text{ ч } R_1}{R_1 + R_1} = \frac{R_1^2}{2R_1} = \frac{R_1}{2},$$

также 
$$R_2^* = \frac{R_1}{2};$$

3) далее по (3.1.4) имеем:

$$R_* = \frac{\text{ж } R_1^2 \text{ ч}}{\text{и } 4 \text{ ш}}^{1/2} = \frac{R_1}{2}. \quad (3.1.9)$$

3<sup>0</sup>. Расчетные формулы для определения параметров  $k_w$ ,  $m$  при испытаниях на ЧШМ при нулевой начальной,  $a_0 = 0$  площадке контакта:

1) формула для определения  $m$  при трении шара и плоскости не содержит радиуса  $R$ , поэтому соответствующая формула для ЧШМ полностью совпадает с (2.1.11):

$$m = \frac{1 - 2\beta}{2\beta}; \quad (3.1.10)$$

2) для получения формулы для определения  $k_w$  в случае ЧШМ, необходимо в формуле (2.1.12) для шара и плоскости вместо  $R$  подставить  $R_*$  по (3.1.9):

$$k_w = \frac{c^{2m+2\beta}}{R_* (Q/\pi)^m}, \quad (3.1.11)$$

где  $R_* = R_1/2$ ,  $R_1$  – радиус шара в ЧШМ.

4<sup>0</sup>. Аналогичным образом получаем формулы для определения параметров  $k_w$ ,  $m$  при  $a_0 \neq 0$ :

1) уравнение для определения параметра  $m$  при испытаниях по схеме шар-плоскость (2.2.15) совпадает с уравнением для испытаний на ЧШМ:

$$\frac{(a_1/a_0)^{2m+2} - 1}{(a_2/a_0)^{2m+2} - 1} = \frac{s_1}{s_2}; \quad (3.1.12)$$

2) формулу для определения  $k_w$  в случае ЧШМ получаем заменяя в (2.2.16) величину  $R$  на  $R_* = R_1/2$ :

$$k_w = \frac{a_1^{2m+2} - a_0^{2m+2}}{(2m+2)R_*(Q/\pi)^m s_1}. \quad (3.1.13)$$

#### 4. Физико-статистическая безразмерная модель и критерий подобия процесса изнашивания

##### 4.1. Безразмерные комплексы модели и критериальное уравнения процесса изнашивания

1<sup>0</sup>. В соответствии с общей теорией подобия и размерностей (ТПР): на первом этапе выписываются все определяющие и определяемые величины, влияющие на процесс. В нашем случае этими величинами являются  $u_w$ , мм – износ;  $S$ , мм – путь трения;  $\sigma$ , кг/мм<sup>2</sup> – давление;  $HB$ , кг/мм<sup>2</sup> – твердость изнашиваемой поверхности (например по Бринеллю);  $V$ , мм/с – скорость взаимного скольжения поверх-

ностей;  $a$ , мм – размер площадки контакта;  $\nu_0$ , мм<sup>2</sup>/с – кинематическая вязкость смазки;  $a\ddot{y}$ , мм<sup>2</sup>/с – коэффициент теплопроводности материала изнашиваемой поверхности.

2<sup>0</sup>. В соответствии с ТПР на втором этапе из определяемых и определяющих величин составляются безразмерные комплексы;

1) в качестве определяемого безразмерного комплекса примем величину безразмерного износа:

$$\pi_w = \frac{u_w}{S}, \text{ мм/мм [1]} \quad (4.1.1)$$

или в дифференциальной форме интенсивность износа:

$$\pi_{w\dot{y}} = \frac{du_w}{ds}, \text{ мм/мм [1]}; \quad (4.1.2)$$

2) для случая изнашивания со смазкой в качестве определяющего комплекса можно принять комплекс вида:

$$\pi_{q1} = \frac{\text{ж } \sigma \text{ ц ж } \nu R \text{ ц}}{\text{и } HB \text{ Ш и } \nu_0 \text{ Ш}} = \frac{\sigma \nu R}{HB \nu_0}, \quad (4.1.3)$$

3) для случая изнашивания без смазки в качестве определяющего комплекса можно принять комплекс вида:

$$\pi_{q2} = \frac{\text{ж } \sigma \text{ ц ж } \nu R \text{ ц}}{\text{и } HB \text{ Ш и } a\ddot{y} \text{ Ш}} = \frac{\sigma \nu R}{HB a\ddot{y}}. \quad (4.1.4)$$

3<sup>0</sup>. На третьем этапе ТПР между определяемыми и определяющими комплексами устанавливаются экспериментальные зависимости:

1) в случае изнашивания со смазкой критериальные уравнения могут быть в виде:

$$\frac{du_w}{ds} = \frac{\text{ж } \sigma \text{ ц ж } \nu R \text{ ц}}{k_w \text{ и } HB \text{ Ш}} \frac{\bar{m}}{\nu_0}, \quad (4.1.5)$$

или в более общем виде:

$$\frac{du_w}{ds} = \frac{\text{ж } \sigma \text{ ц ж } \nu R \text{ ц}}{k_w \text{ и } HB \text{ Ш}} \frac{\bar{m}}{\nu_0} \frac{\bar{n}}{\text{и}}; \quad (4.1.6)$$

2) в случае изнашивания без смазки аналогично могут быть взяты критериальные уравнения вида:

$$\frac{du_w}{ds} = \frac{\text{ж } \sigma \text{ ц ж } \nu R \text{ ц}}{k_w \text{ и } HB \text{ Ш}} \frac{\bar{m}}{a\ddot{y}}, \quad (4.1.7)$$

или

$$\frac{du_w}{ds} = \frac{\text{ж } \sigma \text{ ц ж } \nu R \text{ ц}}{k_w \text{ и } HB \text{ Ш}} \frac{\bar{m}}{\text{и}} \frac{\bar{n}}{a\ddot{y} \text{ Ш}}. \quad (4.1.8)$$

#### 4.2. Определение параметров безразмерных моделей и критериальных уравнений

1<sup>0</sup>. Основным достоинством предложенных безразмерных критериев, моделей и критериальных уравнений является возможность связать параметры этих безразмерных моделей с размерными моделями.

Это важно в связи с тем, что методика определения размерных параметров обработана в предыдущих подразделах.

2<sup>0</sup>. В случае испытаний со смазкой

1) установим зависимость между параметрами размерной модели (2.2.1)

$$\frac{du_w}{ds} = k_w \sigma^m,$$

и безразмерной модели (4.1.5)

$$\frac{du_w}{ds} = \frac{\text{ж } \sigma \text{ ц ж } \nu R \text{ ц}}{k_w \text{ и } HB \text{ Ш}} \frac{\bar{m}}{\nu_0};$$

2) приравнявая, левые и правые части (2.2.1) и (4.1.5), имеем

$$k_w \sigma^m = \bar{k}_w \frac{\mu}{\mu} \frac{\sigma}{HB} \frac{\mu}{\mu} \frac{vR}{v_0}, \quad (4.1.9)$$

3) отсюда имеем

$$\bar{m} = m, \quad (4.1.10)$$

$$\bar{k}_w = k_w (HB)^{\bar{m}} \frac{v_0}{vR}. \quad (4.1.11)$$

3<sup>0</sup>. В случае испытаний без смазки:

1) безразмерная модель изнашивания имеет вид:

$$\frac{du_w}{ds} = \bar{k}_w \frac{\mu}{\mu} \frac{\sigma}{HB} \frac{\mu}{\mu} \frac{va}{a\check{y}}; \quad (4.1.12)$$

2) приравнявая (2.2.1) и (4.1.12) получаем в этом случае:

$$\bar{k}_w = k_w (HB)^{\bar{m}} \frac{a\check{y}}{a}, \quad (4.1.13)$$

напомним  $a\check{y}$ - коэффициент теплопроводности.

3<sup>0</sup>. Интегральные безразмерные модели:

1) в случае испытаний со смазкой имеют вид:

$$\pi_w = \bar{u}_w = \frac{u_w}{s} = \bar{k}_w \frac{\mu}{\mu} \frac{\sigma}{HB} \frac{\mu}{\mu} \frac{va}{v_0}; \quad (4.1.14)$$

2) в случае испытаний без смазки:

$$\pi_w = \bar{u}_w = \frac{u_w}{s} = \bar{k}_w \frac{\mu}{\mu} \frac{\sigma}{HB} \frac{\mu}{\mu} \frac{va}{a\check{y}}. \quad (4.1.15)$$

#### 4.3. Вероятность модели изнашивания

1<sup>0</sup>. Будем полагать, что все определяющие величины в моделях (4.1.14) и (4.1.15):

1) являются случайными величинами, распределенными по нормальному закону. Для каждой из величин полагаем известными средние значения  $\bar{\sigma}$ ,  $\overline{HB}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{a}$ ,  $\bar{a\check{y}}$  и коэффициенты вариации  $v_\sigma$ ,  $v_{HB}$ ,  $v_v$ ,  $v_a$ ,  $v_{a\check{y}}$ ;

2) в этом случае безразмерные комплексы (безразмерный износ  $\bar{u}_w$ ) также будет распределен по нормальному закону.

#### 4.4. Вероятностные основы гипотезы модели схватывания

1<sup>0</sup>. Для определения параметров модели схватывания со сталью порошка меди из смазки проведем следующие испытания:

1) по результатам испытаний на ЧШМ на износ стальных поверхностей со смазкой без ПАВ и без медного порошка получаем зависимость размера площадки контакта от пути трения  $a_I(s)$ ;

2) аналогично по результатам испытаний на износ на ЧШМ стальных поверхностей со смазкой без ПАВ, но с частицами порошка меди получаем вторую зависимость размера площадки контакта от трения в виде  $a_{II}(s)$ ;

3) пусть при нанесении зависимостей  $a_I(s)$  и  $a_{II}(s)$  на один график получаем кривые пересекающиеся в одной точке  $(a_k, s_k)$  по схеме рис. 1.

2<sup>0</sup>. Объяснения характера кривых:

1) на участке  $OK$  кривой 1 с порошком меди поверхность изнашивания интенсивней, чем на участке  $OK$  кривой 2 без порошка;

2) на этом участке вероятность схватывания меди из смазки со сталью мала;

3) на участке  $KCu$  кривой 1 износ стал меньше, чем на участке  $KB$  кривой 2; это объясняется тем, что уже произошло схватывание меди из порошка со сталью, появилось покрытие и износ уменьшился;

4) таким образом можно полагать, что в точке  $K$  обеспечиваются предельные условия, обеспечивающие схватывание меди со сталью.

Такова первая основная рабочая экспериментально обоснованная гипотеза модели схватывания меди из смазки со сталью.

3<sup>0</sup>. Основные соотношения вероятностной модели схватывания порошка меди из смазки со сталью:

1) текущее значение вероятностного критерия схватывания, как величина пропорциональной износу по (4.1.4) имеет вид:

$$\pi_q = \bar{k}_w \frac{\sigma}{HB} \frac{\psi}{\psi_0} \frac{va}{v_0}; \quad (4.1.6)$$

2) предельное значение величины критерия схватывания меди со сталью  $\pi_q^*$  вычисляемого по (4.1.6) в критической точке  $K$  пересечения графиков по рис. 4.1:

$$\pi_q^* = \bar{k}_w \frac{\sigma_k}{HB_k} \frac{\psi}{\psi_0} \frac{v_k a_k}{v_{0k}}. \quad (4.1.17)$$

#### 4.5. Определение вероятности схватывания меди со сталью

1<sup>0</sup>. Условие схватывания:

1) Сначала введем коэффициент запаса  $n$  по схватыванию в виде соотношения:

$$n = \frac{\bar{\pi}_q}{\bar{\pi}_q^*}; \quad (4.1.18)$$

2) где черта указывает на среднее значение условия схватывания порошка меди в смазке со сталью:

$$\pi_q \dot{\bar{\pi}}_q^*; \quad (4.1.19)$$

3) полагаем, что  $\tilde{\pi}_q$  и  $\tilde{\pi}_q^*$  величины случайные, распределенные по нормальному закону: и имеющие средние значение  $\bar{\pi}_q$ ,  $\bar{\pi}_q^*$  и коэффициенты вариации  $v_{\pi_q}$ ,  $v_{\pi_q^*}$ ;

4) в соответствии с общей теорией надежности квантиль  $u_p$  вероятности схватывания можно записать в виде:

$$u_p = \frac{n-1}{\sqrt{n^2 v_{\pi_q}^2 + v_{\pi_q^*}}}. \quad (4.1.20)$$

#### Выводы по части I работы

1. Первым главным этапом в реализации эффекта безизносности Гаркунова является нанесение меди на стальную поверхность и обеспечение схватывания меди со сталью.

2. Главной задачей работы было показать, что при трении стали со сталью в смазке, содержащей порошок меди, с некоторой вероятностью на поверхность стали наносится слой меди.

3. При разработке математической модели процесса схватывания меди со сталью были использованы основные положения метода теории подобия и размерностей. На основе известных значений о процессе схватывания в качестве основных определяющих величин приняты: давление твердость скорости скольжения, размер площадки трения, кинетическая вязкость смазки.

На основании размерного анализа показано, что в качестве критерия подобия в процессе схватывания, может быть, взят комплекс:

$$\pi_q = \frac{\sigma}{HB} \frac{va}{v_0}.$$

в качестве определяемого критерия взята безразмерная величина интенсивности изнашивания:

$$\pi_w = \frac{du_w}{ds}.$$

4. Из эксперимента на изнашивание, в цилиндр-плоскость была установлена дифференциальная зависимость определяемого критерия от определяющего в форме:

$$\frac{du_w}{ds} = \bar{k}_w \frac{\sigma}{\text{HB}} \frac{\zeta}{\zeta_{\text{ш}}} \frac{va}{v_0}.$$

Интегральная зависимость определяемого критерия от определяющего получена в виде:

$$u_w = \bar{k}_w \frac{\sigma}{\text{HB}} \frac{\zeta}{\zeta_{\text{ш}}} \frac{va}{v_0} s.$$

5. Найдена зависимость параметров критериального уравнения от параметров размерной модели изнашивания:

$$\frac{du_w}{ds} = k_w \sigma^m,$$

методика определения коротких для схемы шар-шар хорошо разработана.

6. Разработана физико-статистическая модель и критерий изнашивания поверхности стали при смазке с добавками медного порошка.

7. Принято в качестве допущения, что пересечение кривых изнашивания  $a(s)$  со смазкой без добавки меди с кривой  $a(s)$ , полученной со смазкой с добавкой меди, является критической точкой, в которой безразмерный критерий схватывания достигает предельного значения.

8. На основе понятия предельного и текущего значения критерия схватывания введено понятие коэффициента запаса меди со сталью по схватыванию.

9. Разработанная математическая модель процесса схватывания порошка из меди со сталью позволяет определить вероятность схватывания меди из порошка со сталью

10. Показано, что при добавлении порошка меди в смазку не содержащую ПАВ в любой момент испытаний возникает сцепление (схватывание) меди со сталью с некоторой вероятностью, определяемой на основе испытаний на износ по схеме цилиндр плоскость.

11. Таким образом, показано, что реализация эффекта безизносности Гаркунова при наличии смазки с активным ПАВ, является частным случаем нанесения меди на сталь при смазке, не содержащей ПАВ.

12. Отличие эффекта Гаркунова от эффекта медного порошка в смазке состоит только в скорости процесса, в продолжительности и силе удержания смазки без ПАВ на меди в сравнении со случаем Гаркунова, когда в смазке имеется ПАВ.

13. Главный вывод: доказано экспериментально и физико-статистически обосновано нанесения медного покрытия на сталь из смазки без ПАВ содержащей медный порошок, явление рассматривается как новый трибологический эффект.

Механизм нанесения покрытия из порошка в смазке состоит при определенных условиях в обеспечении схватывания меди со сталью. Процесс этого схватывания имеет вероятностную природу и происходит с некоторой вероятностью возрастающей во времени.

Для определенности и в отличие от эффекта Гаркунова предлагается открытый эффект назвать эффектами нанесения медного покрытия из порошка в смазке.

## Литература

1. Кузьменко А.Г., Дыха А.В. Метод испытаний на износ со смазкой по четырехшариковой схеме (теория износа шаров в ЧШМ) // Проблемы трибологии. – 2003. – № 3. – С. 30-44.
2. Кузьменко А.Г., Дыха О.В. Дослідження зносостійкості взаємодії змащення поверхонь тертя. Хмельницький: ХНУ. – 2005. – 183 с.
3. Кузьменко А.Г., Дыха А.В. Контакт, трение и износ смазанных поверхностей. – Хмельницький: ХНУ, 2007. – 344 с.
4. Кузьменко А.Г., Дыха А.В., Бабак О.П. Контактная механика и износостойкость смазанных трибосистем. – Хмельницький: ХНУ, 2011. – 250 с.
5. Кузьменко А.Г., Сытник С.В., Кузьменко Г.А. Износ шара и плоскости (жесткий контакт) // Проблемы трибологии. – 1998. – № 2. – С. 21-40.
6. Кузьменко А.Г. Развитие методов контактной трибомеханики. – Хмельницький: ХНУ, 2010. – 270 с.

---

7. Кузьменко А.Г. Прикладная теория методов испытаний на износ. – Хмельницкий: ХНУ. – 579 с.

Надійшла 15.06.2011