

**Кузьменко А.Г.,**  
**Паламар А.М.**  
 Хмельницкий национальный  
 университет,  
 м. Хмельницкий, Украина  
**E-mail:** kuzmenko-36@mail.ru

## ТРЕХФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА (МФ) В ИЗНОСЕ. ЧАСТЬ 2 – ЭКСПЕРИМЕНТ

УДК 621.891

В соответствии с теорией модели и методиками испытаний части 1, проведены испытания 4-х пар трения из материалов: Сталь ШХ15 – Сталь Р6М5; Сталь ШХ15 – Сталь ШХ15; Бронза БрО10 – Сталь У10А; Сталь 5 – Сталь У10А

### 2. Схема испытаний, методика и общие расчетные формулы

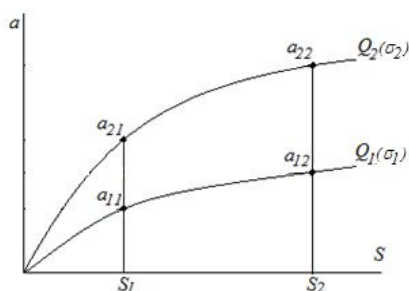


Рис. 2.1 – Схема испытаний

1) выбор базовых точек по схеме рисунок 2.1:  $a_{11}(S_1); a_{12}(S_2); a_{21}(S_1); a_{22}(S_2)$ ; определение параметров аппроксимирующих функций  $a(S) = CS^\beta$  по формулам (1.14):

$$\beta_1 = \frac{\lg a_{11}/a_{12}}{\lg S_1/S_2}; \beta_2 = \frac{\lg a_{21}/a_{22}}{\lg S_1/S_2}; \quad (2.1)$$

$$C_1 = \frac{a_1(S_1)}{S_1^{\beta_1}}; C_2 = \frac{a_2(S_1)}{S_1^{\beta_2}};$$

2) определение параметра модели  $m$  по (1.20):

$$m = \beta_1 \frac{\lg(a_{12}/a_{22})}{\lg(Q_1/Q_2)}; \quad (2.2)$$

3) определение параметра модели  $n$  по (1.22):

$$n = \frac{1}{2} \left\{ 2\beta_1 \frac{\lg(a_{12}/a_{22})}{\lg(Q_1/Q_2)} + 2 - \beta_1 \right\} \quad (2.3)$$

4) определение параметра модели  $K_w$  по (1.23):

$$K_{w_n} = \frac{a_{11}^{2m+2-2n}}{(2m+2-2n)R(Q_1/\pi)^m S_1}; \quad (2.4)$$

5) оценка влияния размера площадки на износ по (1.25):

$$\frac{U_{w1}}{U_{w2}} = \left( \frac{a_1}{a_2} \right)^{2n}; \quad (2.5)$$

$$n = \frac{1}{2} (2m + 2 - \beta_1). \quad (2.6)$$

#### 2.1. Опыт 1. Испытываемая пара: Сталь ШХ15 – Сталь Р6М5 по схеме шар-плоскость

##### 2.1.1. Условия испытаний

1) шарик из стали ШХ15 скользит по дисковой фрезе из стали Р6М5 при смазке «Литол – 24»; диск вращается шарик неподвижен;

2) число оборотов диска  $n = 280$  об/мин;

- 3) радиус дорожки качения  $R_0 = 35$  мм;
- 4) радиус шарика  $R = 6,35$  мм.
- 5) нагрузка на шарик  $Q_1 = 1$  кг;  $Q_2 = 2$  кг.
- 6) установка для испытаний: универсальная портативная машина УМ-23 на основе шурупверта.
- 7) износ шарика, размер  $2a$  площадки износа шарика измеряется периодически через 5 минут с помощью измерительного микроскопа с точностью 10 мкм.
- 8) Результаты испытаний представлены в таблице 2.1.

## 2.1.2. Результаты испытаний

Таблица 1

## Результаты испытаний

| $Q_1 = 1$ кг    |                           |                 |                | $Q_2 = 2$ кг    |                           |                 |                |
|-----------------|---------------------------|-----------------|----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|----------------|
| $t, \text{мин}$ | $S \cdot 10^5, \text{мм}$ | $2a, \text{мм}$ | $a, \text{мм}$ | $t, \text{мин}$ | $S \cdot 10^5, \text{мм}$ | $2a, \text{мм}$ | $a, \text{мм}$ |
| 5               | $S_1=3$                   | 0,072           | $a_{11}=0,036$ | 5               | $S_1=3$                   | 0,0922          | $a_{21}=0,046$ |
| 10              | 6                         | 0,078           | 0,039          | 10              | 6                         | 0,097           | 0,0485         |
| 15              | $S_2=9$                   | 0,0815          | $a_{12}=0,041$ | 15              | $S_2=9$                   | 0,1015          | $a_{22}=0,051$ |

## 2.1.3. Обработка результатов испытаний

- 1) путь трения изнашиваемой поверхности шарика за  $t$  минут, (за  $t = 5$  минут):

$$S = 2\pi R_0 n t; \quad S(t=5) = 2\pi 35 \cdot 280 \cdot 5 = 3 \cdot 10^5 \text{ мм};$$

базовые точки указаны в таблице 1.

- 2) параметры  $\beta_1, \beta_2, C_1, C_2$  по (2.1):

$$\beta_1 = \frac{\lg a_{11}/a_{12}}{\lg S_1/S_2} = \frac{\lg 0,036/0,0408}{\lg 3/9} = 0,114;$$

$$\beta_2 = \frac{\lg a_{21}/a_{22}}{\lg S_1/S_2} = \frac{\lg 0,046/0,0507}{\lg 3/9} = 0,0886;$$

$$C_1 = \frac{a_{11}}{S_1^{\beta_1}} = \frac{0,036}{(3 \cdot 10^5)^{0,114}} = 0,011;$$

$$C_2 = \frac{a_{21}}{S_1^{\beta_2}} = \frac{0,046}{(3 \cdot 10^5)^{0,0886}} = 0,0185;$$

- 3) параметр  $m$  по (2.2):

$$m = \beta_1 \frac{\lg(a_{12}/a_{22})}{\lg(Q_1/Q_2)} = 0,114 \frac{\lg(0,0408/0,0507)}{\lg(1/2)} = 0,0357;$$

- 4) параметр  $n$  по (2.6):

$$n = \frac{1}{2}(2m + 2 - \beta_1) = \frac{1}{2}(2 \cdot 0,0357 + 2 - 0,114) = 0,979;$$

- 5) параметр  $K_w$  по (2.4):

$$K_w = \frac{a_{11}^{2m+2-2n}}{(2m+2-2n)R(Q_1/\pi)^m S_1} = \frac{a_{11}^{2m+2-2n}}{(2 \cdot 0,0357 + 2 - 2 \cdot 0,979) \cdot 6,35 \cdot (1/\pi)^{0,0357} \cdot 3 \cdot 10^5} = 1,7 \cdot 10^{-7};$$

- 6) в итоге вид модели масштабного фактора имеет вид:

$$U_w = 1,7 \cdot 10^{-7} \cdot \sigma^{0,0357} \cdot a^{2 \cdot 0,979};$$

при повышении площадки в 2 раза износ от увеличения масштаба увеличивается в  $2^{2 \cdot 0,979} = 3,885$  раза.

## 2.2. Опыт 2. Испытания на износ пары: Сталь ШХ15 - Сталь ШХ15

## 2.2.1. Условия испытаний

- 1) испытания выполнялись по 4-х шариковой схеме с диаметром шариков 12,7 мм;
- 2) число оборотов  $n = 950$  об/мин;

3) общая нагрузка на центральный шарик:  $Q_1 = 11,8$  кг;  $Q_2 = 15,5$  кг;

4) нагрузка (нормальная) в контакте:

$$Q_n = \frac{Q}{3 \cdot \cos \alpha} = \frac{Q}{3 \cdot \cos 35,26^\circ} = 0,436Q;$$

5) путь трения точки нижнего шарика:

$$S(t=5) = 2\pi R_g n t = 2\pi \cdot 6,35 \cdot 950 \cdot 5 = 2 \cdot 10^5 \text{ мм};$$

6) приведенный радиус в контакте:

$$R_* = (R_1^* \cdot R_2^*)^{1/2}; \quad \frac{1}{R_1^*} = \frac{2}{R}; \quad R_* = \frac{R}{2} = \frac{6,35}{2} = 3,18 \text{ мм};$$

7) смазка «Литол-24».

### 2.2.2. Результаты испытаний

Таблица 2

Результаты испытаний

| $Q_1 = 11,8$ кг; |                           |                 |                | $Q_2 = 15,5$ кг; |                           |                 |                |
|------------------|---------------------------|-----------------|----------------|------------------|---------------------------|-----------------|----------------|
| $t, \text{мин}$  | $S \cdot 10^5, \text{мм}$ | $2a, \text{мм}$ | $a, \text{мм}$ | $t, \text{мин}$  | $S \cdot 10^5, \text{мм}$ | $2a, \text{мм}$ | $a, \text{мм}$ |
| 5                | $S_1=2$                   | 0,038           | $a_{11}=0,019$ | 5                | $S_1=2$                   | 0,044           | $a_{21}=0,022$ |
| 10               | 4                         | 0,045           | 0,0225         | 10               | 4                         | 0,049           | 0,0245         |
| 15               | $S_2=6$                   | 0,052           | $a_{12}=0,026$ | 15               | $S_2=6$                   | 0,056           | $a_{22}=0,028$ |

### 2.2.3. Обработка результатов испытаний

1) параметры  $\beta_1, \beta_2, C_1, C_2$  по (2.1):

$$\beta_1 = \frac{\lg a_{11}/a_{12}}{\lg S_1/S_2} = \frac{\lg 0,019/0,026}{\lg 2/6} = 0,2855;$$

$$C_1 = \frac{a_{11}}{S_1^{\beta_1}} = \frac{0,019}{(2 \cdot 10^5)^{0,2855}} = 3,5 \cdot 10^{-4};$$

2) параметр  $m$  по (2.2):

$$m = \beta_1 \frac{\lg(a_{12}/a_{22})}{\lg(Q_1/Q_2)} = 0,2855 \frac{\lg(0,019/0,026)}{\lg(11,8/15,5)} = 0,077;$$

3) параметр  $n$  по (2.6):

$$n = \frac{1}{2}(2m + 2 - \beta_1) = \frac{1}{2}(2 \cdot 0,077 + 2 - 0,2855) = 0,934;$$

4) параметр  $K_w$  по (2.4):

$$K_w = \frac{a_{11}^{2m+2-2n}}{(2m+2-2n)R_* (Q_1/\pi)^m S_1} = \frac{a_{11}^{2 \cdot 0,077 + 2 - 2 \cdot 0,934}}{(2 \cdot 0,077 + 2 - 2 \cdot 0,934) \cdot 3,18 \cdot (11,8/\pi)^{0,077} \cdot 2 \cdot 10^5} = 0,193 \cdot 10^{-7}.$$

## 2.3. Опыт 3. Испытания на износ пары: Бронза БрО10 – Сталь У10А

### 2.3.1. Схема и условия испытаний

1) испытания выполнены по схеме перекрестных цилиндров  $R_1 \perp R_2$ :

$R_1 = 5$  мм – бронза;  $R_2 = 12,5$  мм – сталь X15 (вращающийся цилиндр);

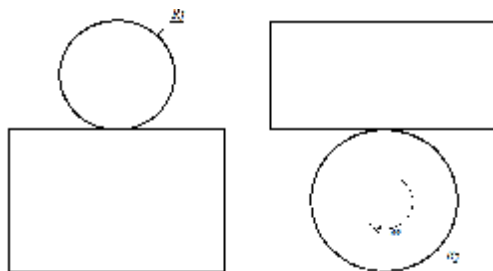


Рис.2.2 – Схема перекрестных цилиндров

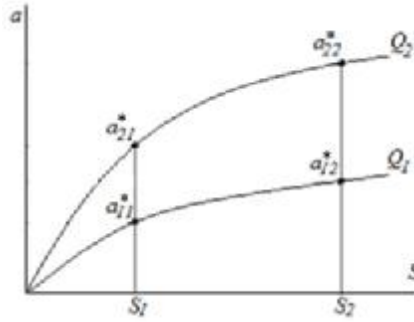


Рис. 2.3 – Схема испытаний

2) число оборотов  $n = 90$  об/мин;

3) общая нагрузка на центральный шарик  $Q_1 = 1,2$  кг;  $Q_2 = 2,4$  кг;

4) путь трения точки нижнего шарика:

$$S(t=5) = 2\pi R_2 n t = 2\pi \cdot 12,5 \cdot 90 \cdot 5 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

5) приведенный радиус в контакте:

$$\frac{1}{R_*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}; \quad R_* = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}; \quad R_* = \frac{5 \cdot 12,5}{5 + 12,5} = 5 \text{ мм};$$

6) смазка «Литол-24»;

7) приведенный размер круговой площадки  $a_* = (a \cdot b)^{1/2}$ ;  $a, b$  -полуоси эллиптической площадки.

### 2.3.2. Результаты испытаний

Таблица 3

| $Q_1 = 0,42$ кг |                           |                     |                     |                   | $Q_2 = 0,84$ кг |                           |                     |                     |                   |
|-----------------|---------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-----------------|---------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| $t, \text{мин}$ | $S \cdot 10^5, \text{мм}$ | $\frac{2a}{a}$      | $\frac{2b}{b}$      | $a_*, \text{мм}$  | $t, \text{мин}$ | $S \cdot 10^5, \text{мм}$ | $\frac{2a}{a}$      | $\frac{2b}{b}$      | $a_*, \text{мм}$  |
| 5               | $S_1 = 0,35$              | $\frac{0,8}{0,4}$   | $\frac{0,25}{0,13}$ | $a_{11}^* = 0,22$ | 5               | $S_1 = 0,35$              | $\frac{0,9}{0,45}$  | $\frac{0,35}{0,18}$ | $a_{21}^* = 0,3$  |
| 10              | 0,7                       | $\frac{1,05}{0,52}$ | $\frac{0,4}{0,2}$   | 0,32              | 10              | 0,7                       | $\frac{1,25}{0,62}$ | $\frac{0,55}{0,28}$ | 0,42              |
| 15              | $S_2 = 1,05$              | $\frac{1,25}{0,62}$ | $\frac{0,45}{0,23}$ | $a_{12}^* = 0,37$ | 15              | $S_2 = 1,05$              | $\frac{1,4}{0,7}$   | $\frac{0,75}{0,38}$ | $a_{22}^* = 0,52$ |

### 2.3.3. Обработка результатов испытаний

1) параметры  $\beta_1, \beta_2$  по (2.1):

$$\beta_1 = \frac{\lg a_{11}^* / a_{12}^*}{\lg S_1 / S_2} = \frac{\lg 0,22 / 0,37}{\lg 0,35 / 1,05} = 0,132;$$

$$\beta_2 = \frac{\lg a_{21}^* / a_{22}^*}{\lg S_1 / S_2} = \frac{\lg 0,31 / 0,52}{\lg 0,35 / 1,05} = 0,47;$$

2) параметр  $m$  по (2.2):

$$m = \beta_1 \frac{\lg a_{12}^* / a_{22}^*}{\lg(Q_1 / Q_2)} = 0,132 \frac{\lg(0,37 / 0,52)}{\lg(0,42 / 0,84)} = 0,065;$$

3) параметр  $n$  по (2.6):

$$n = \frac{1}{2}(2m + 2 - \beta_1) = \frac{1}{2}(2 \cdot 0,065 + 2 - 0,132) = 0,999;$$

4) параметр  $K_w$  по (2.4):

$$K_w = \frac{a_{11}^{2m+2-2n}}{(2m+2-2n)R_*(Q_1/\pi)^m S_1} = \frac{0,22^{2 \cdot 0,065 + 2 - 2 \cdot 0,999}}{(2 \cdot 0,065 + 2 - 2 \cdot 0,999) \cdot 5 \cdot (0,42/\pi)^{0,065} \cdot 0,35 \cdot 10^5} = 4,1 \cdot 10^{-5}.$$

**2.4. Опыт 4. Испытания на износ пары: Сталь 5 – Сталь У10А**

2.4.1. Условия испытаний соответствуют условиям п.2.3

2.4.2. Результаты испытаний

Таблица 4

**Результаты испытаний**

| $Q_1 = 0,73 \text{ кг}$ |                            |                       |                       |                    | $Q_2 = 1,46 \text{ кг}$ |                            |                       |                       |                    |
|-------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| $t, \text{ мин}$        | $S \cdot 10^5, \text{ мм}$ | $\frac{2a}{a}$        | $\frac{2b}{b}$        | $a_*, \text{ мм}$  | $t, \text{ мин}$        | $S \cdot 10^5, \text{ мм}$ | $\frac{2a}{a}$        | $\frac{2b}{b}$        | $a_*, \text{ мм}$  |
| 5                       | $S_1 = 0,35$               | $\frac{0,286}{0,143}$ | $\frac{0,121}{0,06}$  | $a_{11}^* = 0,093$ | 5                       | $S_1 = 0,35$               | $\frac{0,313}{0,156}$ | $\frac{0,137}{0,068}$ | $a_{21}^* = 0,103$ |
| 10                      | 0,7                        | $\frac{0,298}{0,149}$ | $\frac{0,169}{0,085}$ | 0,113              | 10                      | 0,7                        | $\frac{0,461}{0,23}$  | $\frac{0,287}{0,144}$ | 0,182              |
| 15                      | $S_2 = 1,05$               | $\frac{0,325}{0,163}$ | $\frac{0,247}{0,124}$ | $a_{12}^* = 0,142$ | 15                      | $S_2 = 1,05$               | $\frac{0,504}{0,252}$ | $\frac{0,343}{0,172}$ | $a_{22}^* = 0,208$ |

2.4.2. Обработка результатов испытаний

1) параметры  $\beta_1, \beta_2$  по (2.1):

$$\beta_1 = \frac{\lg a_{11}^*/a_{12}^*}{\lg S_1/S_2} = \frac{\lg 0,093/0,142}{\lg 0,35/1,05} = 0,386;$$

$$\beta_2 = \frac{\lg a_{21}^*/a_{22}^*}{\lg S_1/S_2} = \frac{\lg 0,103/0,208}{\lg 0,35/1,05} = 0,639;$$

2) параметр  $m$  по (2.2):

$$m = \beta_1 \frac{\lg a_{12}^*/a_{22}^*}{\lg(Q_1/Q_2)} = 0,386 \frac{\lg(0,142/0,208)}{\lg(0,73/1,46)} = 0,213;$$

3) параметр  $n$  по (2.6):

$$n = \frac{1}{2}(2m + 2 - \beta_1) = \frac{1}{2}(2 \cdot 0,213 + 2 - 0,386) = 1,02;$$

4) параметр  $K_w$  по (2.4):

$$K_w = \frac{a_{11}^{2m+2-2n}}{(2m+2-2n)R_*(Q_1/\pi)^m S_1} = \frac{0,093^{2 \cdot 0,213 + 2 - 2 \cdot 1,02}}{(2 \cdot 0,213 + 2 - 2 \cdot 1,02) \cdot 5 \cdot (0,73/\pi)^{0,213} \cdot 0,35 \cdot 10^5} = 0,385 \cdot 10^{-5}.$$

Таблица 5

**Итоговые значения**

| № | Пара трения               | $\beta$ | $m$   | $n$   | $K_w$                 |
|---|---------------------------|---------|-------|-------|-----------------------|
| 1 | Сталь ШХ15 – Сталь Р6М5   | 0,114   | 0,357 | 0,979 | $1,7 \cdot 10^{-7}$   |
| 2 | Сталь ШХ15 – Сталь ШХ15   | 0,285   | 0,077 | 1,063 | $0,193 \cdot 10^{-5}$ |
| 3 | Бронза БрО10 – Сталь У10А | 0,132   | 0,065 | 1,0   | $4,1 \cdot 10^{-5}$   |
| 4 | Сталь 5 – Сталь У10А      | 0,386   | 0,213 | 1,02  | $0,385 \cdot 10^{-5}$ |

**Выводы**

Реализован метод построения трех факторных аналитических моделей трибологических процессов. Выполнены испытания на износ 4-х пар трения. Установлено что зависимость износа от площадки контакта линейная.

Надійшла в редакцію 01.12.2014

Kuzmenko A.G., Palamar A.M. **Three-factor model of the scale factor (SF) in the wear. Part 2**

Implemented method for constructing a three factor analytic models tribological processes. Wear test performed 4 pairs of friction. It has been established that the dependence of the wear of the contact area is linear.