

**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

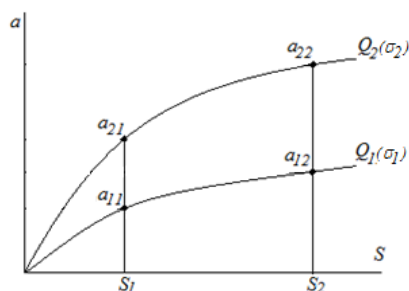


Рис. 2.1 – Схема испытаний

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 $R_d = 35$ 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):

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

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 , мин	$S \cdot 10^5$, мм	$2a$, мм	a , мм	t , мин	$S \cdot 10^5$, мм	$2a$, мм	a , 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

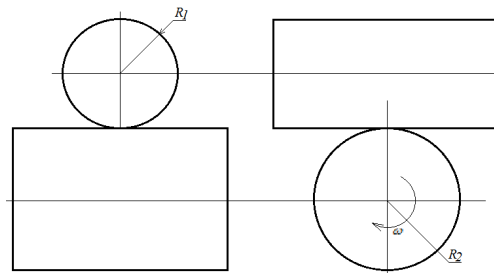
1) испытания выполнены по схеме перекрестных цилиндров $R_1 \perp R_2$: $R_1 = 5 \text{ мм}$ – бронза; $R_2 = 12,5 \text{ мм}$ – сталь Х15 (вращающийся цилиндр);

Рис.2.2 – Схема перекрестных цилиндров

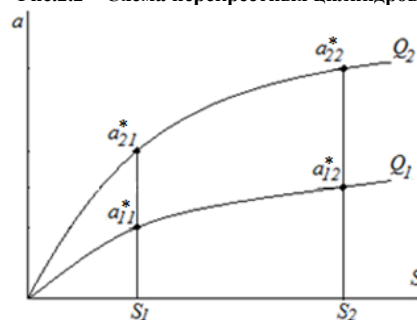


Рис. 2.3 – Схема испытаний

2) число оборотов $n = 90 \text{ об/мин}$;3) общая нагрузка на центральный шарик $Q_1 = 1,2 \text{ кг}$; $Q_2 = 2,4 \text{ кг}$;

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

Результаты испытаний					Результаты испытаний				
$Q_1 = 0,42 \text{ кг}$					$Q_2 = 0,84 \text{ кг}$				
$t, \text{мин}$	$S \cdot 10^5, \text{мм}$	$\frac{2a}{a}$	$\frac{2b}{b}$	$a_*, \text{мм}$	$t, \text{мин}$	$S \cdot 10^5, \text{мм}$	$\frac{2a}{a}$	$\frac{2b}{b}$	$a_*, \text{мм}$
5	$S_1 = 0,35$	$\frac{0,8}{0,4}$	$\frac{0,25}{0,13}$	$a_{11}^* = 0,22$	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 β_1, β_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					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 β_1, β_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	β	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.