

**Кузьменко А.Г.,  
Решетник П.П.**

Хмельницкий национальный университет,  
г. Хмельницкий, Украина

## ИСПЫТАНИЯ НА ТРЕНИЕ И ИЗНОС ПРИ ВНУТРЕННЕМ КАЧЕНИИ ЦИЛИНДРОВ СО ШПОНКОЙ И БЕЗ

### Введение

1. Практически все сопряжения поверхностей в узлах трения машин можно разделить на два вида: 1) герцевский контакт – упругий контакт с малой площадкой контакта  $a \ll R$ ; 2) внутренний контакт цилиндров  $R_1 < R_2$  с площадкой контакта, соизмеримой с радиусом.

2. В ряде случаев цилиндры или валы в машинах вращаются, а их поверхности перекатываются друг по другу. При этом возможно два случая: 1) внутренний и наружный цилиндры соединены устройством типа шпонка или штифт; 2) цилиндры не соединены в окружном направлении и свободно перекатываются друг по другу.

3. Известно, что как в одном, так и в другом случаях при длительном взаимодействии цилиндры изнашиваются.

Цель работы, в конечном счете, состоит в разработке и реализации методов по снижению износа при перекатывании внутренних цилиндрических сопряжений.

4. При разработке методов повышения износостойкости неизбежно реализуются два основных этапа: 1) собственно разработка метода (технологического, конструкционного, подбором смазок и т.д.); 2) второй обязательный этап разработка методов испытаний на износ сопряжений с целью оценки эффективности метода повышения износостойкости.

Реализация этого второго этапа в свою очередь делится на две части: 1) построение математической модели изнашивания; 2) проведение испытаний с определением параметров модели изнашивания.

5. При построении и реализации модели изнашивания необходимо определить: 1) контактное давление в сопряжении; 2) величину пути трения точек одной поверхности по точкам другой поверхности.

В работе [1] рассмотрены теоретические положения по определению пути трения или величины проскальзывания, возникающие при внутреннем качении цилиндров.

6. В данной работе выполнены экспериментальные исследования: 1) пути трения (скольжения); 2) износа поверхностей при внутреннем качении цилиндров, как со шпонкой, так и без шпонки; 3) влияние разных смазок на износ цилиндров.

### 1. Испытание на износ при качении шпоночного соединения

#### 1.1. Методика испытаний

##### 1.1.1. Установка

Основа установки - металлический каркас, на котором находятся основные элементы: двигатель и редуктор, соединенных между собой клиноременной передачей. На валу диаметром 10 мм, крепится подшипник 60200. Первый подшипник нагружается внешней силой, а второй является дополнительной опорой для вала и значительно уменьшает его перемещения, что дает возможность загрузить исследуемый подшипник только в радиальном направлении. Установка ТЕТ-02 предназначена для исследования проскальзывания в радиальных подшипниках качения.

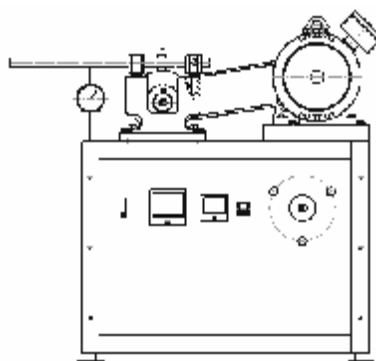


Рис. 1 – Установка ТЕТ-02

Порядок работы:

- 1) установить регулятор оборотов в крайнее левое положение;
- 2) установить переключатель в верхнее (вращение по часовой стрелке) или в нижнее положение (вращение против часовой стрелки);

3) включить сетевой выключатель и регулятором установить необходимую частоту вращения.

Контроль проводится по вольтметру и амперметру. Эти устройства показывают напряжение и ток рабочей обмотки двигателя. Максимально допустимая величина напряжения на рабочей обмотке не должно превышать 110 В.

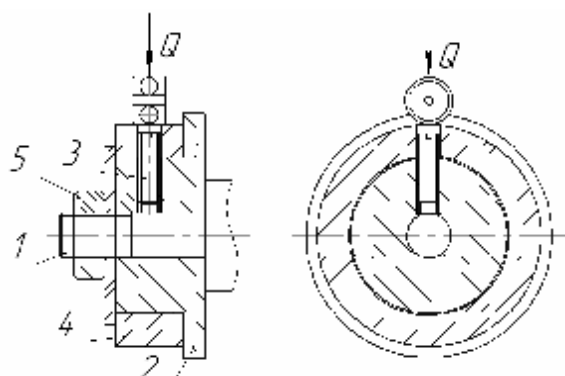


Рис. 2 – Установка со шпонкой

### 1.1.2. Порядок испытаний

1) с помощью шарика  $d = 5,34$  мм на внешней стороне втулки 2 вдавливаем лунку и измеряем её диаметр на ИЗА-2.

2) кольцо 4 надеваем на втулку 2 и с помощью штифта 3 объединяем их между собой.

3) устанавливаем объединённые детали на вал 1, и фиксируем гайкой 5.

4) нагружая устройством, устанавливаем необходимую нагрузку  $Q$  на испытательный узел.

5) включаем установку ТЕТ-03 и регулятором устанавливаем число оборотов  $n$ .

6) после отработанного времени  $t$  выключаем ТЕТ-03.

7) снимаем нагрузку с детали.

8) придерживая приводной пас, отвинчиваем гайку и снимаем деталь с вала.

9) отвинчивая штифт, разъединяем втулку и кольцо.

10) с помощью измерительного устройства ИЗА-2 измеряем диаметр лунки.

11) проводим расчеты по формулам и заносим их в таблицу данных.

### 1.1.3. Способ измерения износа

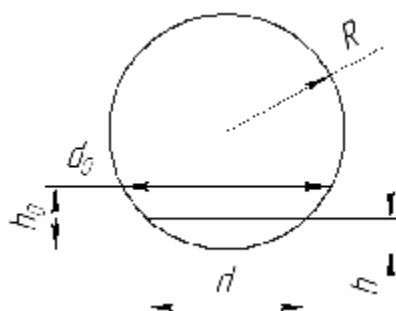


Рис. 3 – Схема вдавливания шарика

1) начальная глубина лунки определяется по зависимости:

$$h_0 = \frac{1}{2}(2R - \sqrt{(2R)^2 - d_0^2}); \quad (1)$$

2) текущая глубина лунки:

$$h = \frac{1}{2}(2R - \sqrt{(2R)^2 - d^2}); \quad (2)$$

3) износ определяется как разница глубин лунок:

$$U_{w2} = h_0 - h = \frac{1}{2}(2R - \sqrt{(2R)^2 - d_0^2} - 2R + \sqrt{(2R)^2 - d^2});$$

$$U_w = \frac{1}{2}(\sqrt{(2R)^2 - d_0^2} - \sqrt{2R - d_0^2}). \quad (3)$$

### 1.2. Порядок обработки результатов

1. Определение глубины отпечатка:

$$U_w = \frac{a^2}{2R}, \quad (4)$$

где  $a$  – радиус отпечатка;

$R$  – радиус вдавливаемого шарика,  $R = 2,67$  мм.

2. Определение глубины износа:

$$\Delta U_w = U_w^0 - U_w^1, \quad (5)$$

где  $U_w^0$  – начальная глубина отпечатка;

$U_w^1$  – глубина отпечатка после проведения испытаний за время  $t$ .

3. Полный путь трения:

$$S_1 = 2bnt, \quad (5)$$

где  $b$  – полуширина полосы контакта;

$n$  – частота вращения детали;

$t$  – время испытаний;

$$\epsilon = 1,128 \left( \frac{Q}{lE} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_2 - R_1} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где  $Q$  – нагрузка на деталь;

$R_1$  – внешний радиус втулки;

$R_2$  – внутренний радиус кольца;

$l$  – ширина втулки.

4. Параметр модели изнашивания  $m$ :

$$m = \frac{\lg \frac{U_{w1}}{U_{w2}}}{\lg \frac{\sigma_{01}}{\sigma_{02}}}, \quad (7)$$

где  $\Delta U_{w1}$ ,  $\Delta U_{w2}$  – величины износа детали при различных нагрузках  $Q$ ;

$\sigma$  – максимальное давление в контакте.

$$\sigma_0 = 0,418 \left( \frac{QE}{l} \cdot \frac{R_2 - R_1}{R_1 R_2} \right). \quad (8)$$

5. Параметр модели изнашивания  $K_w$ :

$$K_w = \frac{(U_{w2})_2}{(\sigma_{02})^2 (S_2)_2}. \quad (9)$$

6. Отношение износа:

$$\frac{U_{w1}}{U_{w2}} = \frac{K_{w1}}{K_{w2}} \cdot \frac{\sigma_0^{m1}}{\sigma_0^{m2}}. \quad (10)$$

### 1.3. Реализация испытаний и их обработка (со шпонкой)

#### 1.3.1. Исходные данные:

$R = 2,67$  мм;  $Q_1 = 10$  кг;  $Q_2 = 20$  кг;  $n = 650$  об/мин;  $R_1 = 35$  мм;  $R_2 = 35,5$  мм;  $\Delta = 0,5$  мм.

#### 1.3.2. Результаты испытаний

Без смазки при нагрузке 10 кг.

1. Определение глубины отпечатка

$$U_w^0 = \frac{a^2}{2R} = \frac{0,9}{5,34} = 0,17 \text{ мм};$$

$$U_w^{100} = \frac{0,87}{5,34} = 0,163 \text{ мм};$$

$$U_w^{200} = \frac{0,85}{5,34} = 0,159 \text{ мм};$$

$$U_w^{300} = \frac{0,83}{5,34} = 0,156 \text{ мм};$$

$$U_w^{600} = \frac{0,8}{5,34} = 0,15 \text{ мм};$$

$$U_w^{900} = \frac{0,77}{5,34} = 0,144 \text{ мм}.$$

2. Определение глубины износа:

$$\Delta U_w^{100} = U_w^0 - U_w^{100} = 0,17 - 0,163 = 0,007 \text{ мм};$$

$$\Delta U_w^{200} = U_w^0 - U_w^{200} = 0,17 - 0,159 = 0,011 \text{ мм};$$

$$\Delta U_w^{300} = U_w^0 - U_w^{300} = 0,17 - 0,156 = 0,014 \text{ мм};$$

$$\Delta U_w^{600} = U_w^0 - U_w^{600} = 0,17 - 0,15 = 0,02 \text{ мм};$$

$$\Delta U_w^{900} = U_w^0 - U_w^{900} = 0,17 - 0,144 = 0,026 \text{ мм}.$$

3. Полный путь трения:

$$S = 2bnt ;$$

$$\epsilon = 1,128 \left( \frac{10}{15 \cdot 2,1 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{17,75 \cdot 17,5}{17,75 - 17,5} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,23 ;$$

$$S_{10}^{100} = 2bnt = 2 \cdot 0,23 \cdot 650 \cdot 100 = 0,3 \cdot 10^5 \text{ мм};$$

$$S_{10}^{200} = 2bnt = 2 \cdot 0,23 \cdot 650 \cdot 200 = 0,6 \cdot 10^5 \text{ мм};$$

$$S_{10}^{300} = 2bnt = 2 \cdot 0,23 \cdot 650 \cdot 300 = 0,9 \cdot 10^5 \text{ мм};$$

$$S_{10}^{600} = 2bnt = 2 \cdot 0,23 \cdot 650 \cdot 600 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ мм};$$

$$S_{10}^{900} = 2bnt = 2 \cdot 0,23 \cdot 650 \cdot 900 = 2,7 \cdot 10^5 \text{ мм}.$$

Остальные расчёты аналогические и занесены в таблицы результатов.

Таблица 1

**Результаты испытаний без использования смазки при нагрузке 10 кг**

№	$t$ , хв	$d$ , мм	$U_w^0$ , мм	$\Delta U_w$ , мм	$S$ , мм·10 <sup>5</sup>
1	-	1,9	0,17	-	-
2	100	1,86	0,163	0,007	0,3
3	200	1,84	0,159	0,011	0,6
4	300	1,825	0,156	0,014	0,9
5	600	1,79	0,15	0,02	1,8
6	900	1,754	0,144	0,027	2,7

Таблица 2

**Результаты испытаний без использования смазки при нагрузке 20 кг**

№	$t$ , хв	$d$ , мм	$U_w^0$ , мм	$\Delta U_w$ , мм	$S$ , мм·10 <sup>5</sup>
1	-	2,0	0,19	-	-
2	100	1,93	0,176	0,014	0,42
3	200	1,894	0,168	0,022	0,84
4	300	1,86	0,162	0,028	1,25
5	600	1,79	0,15	0,04	2,5
6	900	1,717	0,138	0,052	3,75

Принимаем для данного случая при времени 900 минут:  $\Delta U_{w1} = 0,027$  мм и  $\Delta U_{w2} = 0,052$  мм.

$$\sigma_0 = 0,418 \left( \frac{QE}{l} \cdot \frac{R_2 - R_1}{R_1 R_2} \right)^{\frac{1}{2}};$$

$$\sigma_1 = 0,418 \left( \frac{10 \cdot 2,1 \cdot 10^4}{15} \cdot \frac{17,75 - 17,5}{17,5 \cdot 17,75} \right)^{\frac{1}{2}} = 1,4 \text{ кг/мм}^2;$$

$$\sigma_2 = 0,418 \left( \frac{20 \cdot 2,1 \cdot 10^4}{15} \cdot \frac{17,75 - 17,5}{17,5 \cdot 17,75} \right)^{\frac{1}{2}} = 1,98 \text{ кг/мм}^2;$$

$$m = \frac{\lg \frac{0,027}{0,052}}{\lg \frac{1,4}{1,98}} = 1,84.$$

В случаях без смазки, литол 24 и литол 24 + бронзовый порошок, поскольку зазор и нагрузка одинаковы то  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  будут соответственны для каждого из них.

Параметр модели износа  $K_w$

$$K_w = \frac{(U_{w2})_2}{(\sigma_{02})^2 (S_2)_2}; K_w = \frac{0,027}{1,98^2 \cdot 3,75 \cdot 10^5} = 18,4 \cdot 10^{-9};$$

$$U_w = K_w \cdot \sigma_{\max}^m = 18,4 \cdot 10^{-9} \cdot 1,98^{1,84} = 64,7 \cdot 10^{-9}.$$

*Смазка литолом 24*

Таблица 3

**Результаты испытаний с использованием смазки литол 24 при нагрузке 10 кг**

№	t, хв	d, мм	$U_w^0$ , мм	$\Delta U_w$ , мм	S, мм·10 <sup>5</sup>
1	-	1,6	0,12	-	-
2	100	1,57	0,116	0,004	0,3
3	200	1,56	0,114	0,0059	0,6
4	300	1,55	0,113	0,007	0,9
5	600	1,53	0,11	0,01	1,8
6	900	1,51	0,107	0,013	2,7

Таблица 4

**Результаты испытаний с использованием смазки литол 24 при нагрузке 20 кг**

№	t, хв	d, мм	$U_w^0$ , мм	$\Delta U_w$ , мм	S, мм·10 <sup>5</sup>
1	-	1,53	0,11	-	-
2	100	1,476	0,102	0,008	0,42
3	200	1,45	0,0985	0,0115	0,84
4	300	1,432	0,096	0,014	1,25
5	600	1,387	0,09	0,02	2,5
6	900	1,34	0,084	0,026	3,75

Принимаем для данного случая при времени 900 минут:  $\Delta U_{w1} = 0,013$  мм и  $\Delta U_{w2} = 0,026$  мм.

$$m = \frac{\lg \frac{0,013}{0,026}}{\lg \frac{1,4}{1,98}} = 2.$$

Параметр модели износа  $K_w$  :

$$K_w = \frac{(U_{w2})_2}{(\sigma_{02})^2 (S_2)_2};$$

$$K_w = \frac{0,013}{1,98^2 \cdot 3,75 \cdot 10^5} = 8,85 \cdot 10^{-9};$$

$$U_w = K_w \cdot \sigma_{\max}^m = 8,85 \cdot 10^{-9} \cdot 1,98^2 = 34,7 \cdot 10^{-9}.$$

Смазка литолом 24 + порошок бронзы

Таблица 5

**Результаты испытаний с использованием смазки литол 24 + бронзовый порошок при нагрузке 10 кг**

№	$t$ , хв	$d$ , мм	$U_w^0$ , мм	$\Delta U_w$ , мм	$S$ , мм $\cdot 10^5$
1	-	1,95	0,178	-	-
2	100	1,931	0,1746	0,0034	0,3
3	200	1,922	0,173	0,005	0,6
4	300	1,918	0,1722	0,0058	0,9
5	600	1,904	0,1696	0,0084	1,8
6	900	1,89	0,1674	0,0106	2,7

Таблица 6

**Результаты испытаний с использованием смазки литол 24 + бронзовый порошок при нагрузке 20 кг**

№	$t$ , хв	$d$ , мм	$U_w^0$ , мм	$\Delta U_w$ , мм	$S$ , мм $\cdot 10^5$
1	-	2,2	0,23	-	-
2	100	2,18	0,2233	0,0067	0,42
3	200	2,17	0,2204	0,0096	0,84
4	300	2,16	0,2182	0,0118	1,25
5	600	2,14	0,2132	0,0168	2,5
6	900	2,11	0,2085	0,0215	3,75

Принимаем для данного случая при времени 900 минут:  $\Delta U_{w1} = 0,0106$  мм и  $\Delta U_{w2} = 0,0215$  мм.

$$m = \frac{\lg \frac{0,0106}{0,0215}}{\lg \frac{1,4}{1,98}} = 2,04.$$

Параметр модели износа  $K_w$  :

$$K_w = \frac{(U_{w2})_2}{(\sigma_{02})^2 (S_2)_2};$$

$$K_w = \frac{0,0106}{1,98^2 \cdot 3,75 \cdot 10^5} = 7,2 \cdot 10^{-9};$$

$$U_w = K_w \cdot \sigma_{\max}^m = 7,2 \cdot 10^{-9} \cdot 1,98^{2,04} = 29 \cdot 10^{-9}.$$

## 2. Испытания на износ при свободном внутреннем качении цилиндров (без шпонки).

### 2.1. Методика испытаний на проскальзывание

Методика и результаты определения величины проскальзывания:

- 1) на кольцо 3 и на втулку 2 наносим вертикальные линии.
- 2) устанавливаем деталь на вал и зажимаем гайкой.

3) включаем установку на низкие обороты или прокручиваем вручную, считая количество оборотов которые сделает втулка, чтобы кольцо проскользнуло один полный оборот.

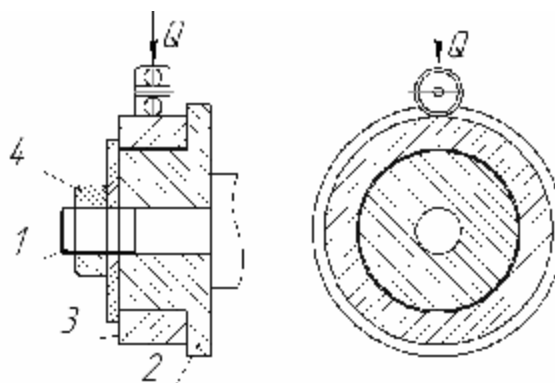


Рис. 4 – Схема установки без шпонки  
1 – вал; 2 – втулка; 3 – кольцо; 4 – гайка

Зависимость величины проскальзывания от зазора и нагрузки при зазоре 1мм коэффициент проскальзывания составляет 1/29, при зазоре 2мм коэффициент составляет 1/17, то есть при изменении зазора коэффициент проскальзывания тоже изменяется, а при изменении нагрузки коэффициент проскальзывания остаётся неизменным.

## 2.2. Методика испытаний на износ

### 2.2.1 Порядок испытаний

- 1) с помощью шарика  $d = 5,34$  мм на внешней стороне втулки 2 вдавливаем лунку и измеряем её диаметр на ИЗА-2;
- 2) кольцо 4 надеваем на втулку 2;
- 3) устанавливаем детали на вал 1, и фиксируем гайкой 5;
- 4) нагружая устройством, устанавливаем необходимую нагрузку  $Q$  на испытательный узел;
- 5) включаем установку ТЕТ-03 и регулятором устанавливаем число оборотов  $n$ ;
- 6) после отработанного времени  $t$  выключаем ТЕТ-03;
- 7) снимаем нагрузку с детали;
- 8) придерживая приводной ремень, отвинчиваем гайку и снимаем деталь с вала;
- 9) отвинчивая штифт, разъединяем втулку и кольцо;
- 10) с помощью измерительного устройства ИЗА-2 измеряем диаметр лунки;
- 11) проводим расчеты по формулам и заносим их в таблицу данных.

## 2.3. Результаты испытаний (без шпонки)

### 2.3.1. Исходные данные

$$R = 2,67 \text{ мм}; Q_1 = 10 \text{ кг}; Q_2 = 20 \text{ кг}; n = 650 \text{ об/мин}; R_1 = 34,7 \text{ мм}; R_2 = 35,7 \text{ мм}; \Delta = 1 \text{ мм}.$$

### 2.3.2. Результаты испытаний

Без смазки

Таблица 7

### Результаты испытаний без использования смазки при нагрузке 10 кг

№	$t$ , хв	$d$ , мм	$U_w^0$ , мм	$\Delta U_w$ , мм	$S$ , мм·10 <sup>5</sup>
1	-	1,81	0,153	-	-
2	100	1,79	0,15	0,003	0,21
3	200	1,78	0,148	0,005	0,42
4	300	1,77	0,146	0,007	0,63
5	600	1,74	0,141	0,012	1,25
6	900	1,7	0,136	0,016	1,87

Таблица 8

**Результаты испытаний без использования смазки при нагрузке 20 кг**

№	$t$ , хв	$d$ , мм	$U_w^0$ , мм	$\Delta U_w$ , мм	$S$ , мм·10 <sup>5</sup>
1	-	2,05	0,196	-	-
2	100	2,01	0,189	0,007	0,3
3	200	1,99	0,185	0,011	0,6
4	300	1,97	0,182	0,014	0,9
5	600	1,93	0,174	0,022	1,8
6	900	1,88	0,166	0,03	2,7

Принимаем для данного случая при времени 900 минут:  $\Delta U_{w1} = 0,016$  мм и  $\Delta U_{w2} = 0,03$  мм.

$$\sigma_0 = 0,418 \left( \frac{QE}{l} \cdot \frac{R_2 - R_1}{R_1 R_2} \right)^{\frac{1}{2}};$$

$$\sigma_1 = 0,418 \left( \frac{10 \cdot 2,1 \cdot 10^4}{15} \cdot \frac{17,85 - 17,35}{17,85 \cdot 17,35} \right)^{\frac{1}{2}} = 1,98 \text{ кг/мм}^2;$$

$$\sigma_2 = 0,418 \left( \frac{20 \cdot 2,1 \cdot 10^4}{15} \cdot \frac{17,85 - 17,35}{17,85 \cdot 17,35} \right)^{\frac{1}{2}} = 2,81 \text{ кг/мм}^2;$$

В случаях без смазки, литол 24 и литол 24 + бронзовый порошок, поскольку зазор и нагрузка одинаковы то  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  будут соответственны для каждого из них.

$$m = \frac{\lg \frac{0,016}{0,03}}{\lg \frac{1,98}{2,81}} = 1,8.$$

Параметр модели износа  $K_w$ :

$$K_w = \frac{(U_{w2})_2}{(S_{02})^2 (S_2)_2}; K_{w1} = \frac{0,016}{2,81^2 \cdot 2,7 \cdot 10^5} = 7,51 \cdot 10^{-9};$$

$$U_{w1} = K_{w1} \cdot \sigma_{\max}^m = 7,51 \cdot 10^{-9} \cdot 2,81^{1,8} = 48,3 \cdot 10^{-9}.$$

Со смазкой литол 24

Таблица 9

**Результаты испытаний с использованием смазки литол 24 при нагрузке 10 кг**

№	$t$ , хв	$d$ , мм	$U_w^0$ , мм	$\Delta U_w$ , мм	$S$ , мм·10 <sup>5</sup>
1	-	1,634	0,125	-	-
2	100	1,62	0,1232	0,0018	0,21
3	200	1,615	0,122	0,003	0,42
4	300	1,61	0,121	0,004	0,62
5	600	1,59	0,1185	0,0065	1,25
6	900	1,574	0,116	0,0092	1,87

Таблица 10

**Результаты испытаний с использованием смазки литол 24 при нагрузке 20 кг**

№	$t$ , хв	$d$ , мм	$U_w^0$ , мм	$\Delta U_w$ , мм	$S$ , мм·10 <sup>5</sup>
1	-	1,74	0,142	-	-
2	100	1,716	0,1379	0,0041	0,3
3	200	1,7	0,1355	0,0065	0,6
4	300	1,69	0,134	0,008	0,9
5	600	1,66	0,129	0,013	1,8
6	900	1,63	0,124	0,017	2,7



Принимаем для данного случая при времени 900 минут:  $\Delta U_{w1} = 0,0092$  мм и  $\Delta U_{w2} = 0,017$  мм:

$$m = \frac{\lg \frac{0,0092}{0,017}}{\lg \frac{1,98}{2,81}} = 1,76.$$

Параметр модели износа  $K_w$ :

$$K_w = \frac{(U_{w2})_2}{(\sigma_{02})^2 (S_2)_2};$$

$$K_{w1} = \frac{0,0092}{2,81^2 \cdot 2,7 \cdot 10^5} = 4,32 \cdot 10^{-9};$$

$$U_{w2} = K_{w2} \cdot \sigma_{\max}^m = 4,32 \cdot 10^{-9} \cdot 2,81^{1,82} = 26,6 \cdot 10^{-9}.$$

Со смазкой литол 24 + бронзовый порошок

Таблица 11

**Результаты испытаний с использованием смазки литол 24 + бронзовый порошок при нагрузке 10 кг**

№	t, хв	d, мм	$U_w^0$ , мм	$\Delta U_w$ , мм	S, мм·10 <sup>5</sup>
1	-	1,72	0,138	-	-
2	100	1,71	0,1365	0,0015	0,21
3	200	1,7	0,1355	0,0025	0,42
4	300	1,696	0,1347	0,0033	0,63
5	600	1,676	0,1315	0,0054	1,25
6	900	1,67	0,1305	0,0075	1,87

Таблица 12

**Результаты испытаний с использованием смазки литол 24 + бронзовый порошок при нагрузке 20 кг**

№	t, хв	d, мм	$U_w^0$ , мм	$\Delta U_w$ , мм	S, мм·10 <sup>5</sup>
1	-	1,80	0,154	-	-
2	100	1,79	0,1503	0,0037	0,3
3	200	1,78	0,1485	0,0055	0,6
4	300	1,77	0,1471	0,0069	0,9
5	600	1,75	0,143	0,011	1,8
6	900	1,73	0,14	0,014	2,7

Принимаем для данного случая при времени 900 минут:  $\Delta U_{w1} = 0,0075$  мм и  $\Delta U_{w2} = 0,014$  мм;

$$m = \frac{\lg \frac{0,0075}{0,014}}{\lg \frac{1,98}{2,81}} = 1,78.$$

Параметр модели износа  $K_w$ :

$$K_w = \frac{(U_{w2})_2}{(\sigma_{02})^2 (S_2)_2};$$

$$K_{w1} = \frac{0,0075}{2,81^2 \cdot 2,7 \cdot 10^5} = 3,52 \cdot 10^{-9};$$

$$U_{W3} = K_{W3} \cdot \sigma_{\max}^m = 3,52 \cdot 10^{-9} \cdot 2,81^{1,78} = 22,14 \cdot 10^{-9}.$$

### 3. Сравнение результатов испытаний со шпонкой и при свободном качении

Таблица 13

#### Результаты исследований

Вид смазки	Со шпонкой			Без шпонки		
	без смазки	литол 24	литол 24 + бронзовый порошок	без смазки	литол 24	литол 24 + бронзовый порошок
Зазор $\Delta$ , мм	0,5	0,5	0,5	1	1	1
$\epsilon^{10}$	0,23	0,23	0,23	0,16	0,16	0,16
$\epsilon^{20}$	0,32	0,32	0,32	0,23	0,23	0,23
$S_{900}^{10}$ , мм·10 <sup>5</sup>	2,7	2,7	2,7	1,87	1,87	1,87
$S_{900}^{20}$ , мм·10 <sup>5</sup>	3,75	3,75	3,75	2,7	2,7	2,7
$G_1$ , кг/мм <sup>2</sup>	1,4	1,4	1,4	1,98	1,98	1,98
$G_2$ , кг/мм <sup>2</sup>	1,98	1,98	1,98	2,81	2,81	2,81
$m$	1,84	2	2,04	1,8	1,76	1,78
$K_W \cdot 10^{-9}$	18,4	8,85	7,2	7,1	4,3	3,52
$U_W \cdot 10^{-9}$	64,7	34,7	29	48,3	26,6	22,1

#### Основные результаты и выводы

1. Разработана методика испытаний на износ при внутреннем качении цилиндров, методика включает:

1) установку для испытаний;

2) методику экспериментального определения величины проскальзывания (путь трения) при свободном качении цилиндров;

3) методику определения износа при внутреннем качении цилиндров.

2. Разработанная методика использована для оценки эффективности смазки и присадки из порошка бронзы на повышение износостойкости сопряжения.

3. В результате испытаний установлено, что:

1) износ цилиндров со шпонкой больше износа цилиндров без шпонки в 1,34 раза, что объясняется соответственно большим путём трения;

2) смазка литолом снижает износ соединения в 1,86 раза;

3) смазка литолом с добавлением бронзового порошка снижает износ в сравнении со смазкой без добавления присадок в 1,2 - 1,9 раз;

4) общее снижение износа при использовании литола с порошком бронзы оценивается 2,34 - 2,18 раза.

4. Предложенные метод испытаний и метод снижения износа могут быть рекомендованы на практике.

#### Литература

1. Кузьменко А.Г. Скольжение, трение и износ при внутреннем качении цилиндров с проскальзыванием // Проблемы трибологии. – 2011. – № 4. – С. 121-131.

2. Кузьменко А.Г. Методы подобия в решении контактных задач для тел двойной кривизны // Проблемы трибологии. – 2008. – № 2. – С. 22-55.

3. Методи розрахунків і випробувань на зношування та надійність / А.Г. Кузьменко // – Хмельницький: 2002. – 151. С.

Надійшла 02.03.2012