

**Кузьменко А.Г.**Хмельницкий национальный университет,  
г. Хмельницкий, Украина**НОВЫЕ МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ  
ИССЛЕДОВАНИЙ АДГЕЗИОННО-  
ДЕФОРМАЦИОННОЙ ТЕОРИИ  
ТРЕНИЯ (АДД ТТ). ЧАСТЬ 2****Содержание**

4. Кинематическая вязкость пластического течения металлической поверхности трения в мягком режиме скольжения
  - 4.1. Теория эксперимента
    - 4.1.1. Аналогия сдвига металла и жидкости шариком и сдвига жидкости между шариком и плоскостью
    - 4.1.2. Закон Ньютона для течения слоя жидкости
    - 4.1.3. Геометрия сдвига слоя поверхности металла шариком
    - 4.1.4. Постановка задачи
    - 4.1.5. Приближенный сдвиговой закон пластического течения:
  - 4.2. Техника эксперимента
    - 4.2.1. Приспособление к прессу Бринелля
    - 4.2.2. Порядок испытаний:
  - 4.3. Реализация эксперимента
    - 4.3.1. Исходные данные
    - 4.3.2. Обработка результатов испытаний
    - 4.3.3. Определение  $\tau_T$  с учетом п. 3.3.
    - 4.3.4. Определение динамической вязкости стали при пластическом течении
    - 4.3.5. Определение кинематической вязкости стали (при течении)
  - 4.4. Основные результаты и выводы по п.4.
5. Износ граничной смазки и изменение адгезионной компоненты при реверсивном трении
  - 5.1. Теория эксперимента
    - 5.1.1. Реверсивное движение контр тела.
    - 5.1.2. Задача эксперимента
    - 5.1.3. Закономерности процесса:
  - 5.2. Техника эксперимента
    - 5.2.1. Установка из подраздела 1.2.1
    - 5.2.2. Порядок работы
  - 5.3. Реализация эксперимента
    - 5.3.1. Исходные данные:
    - 5.3.2. Фактические результаты испытаний представлены в табл. 5.1 - 5.5 и на рис. 5.1 - 5.5
  - 5.4. Основные результаты и выводы по п. 5
    - 5.4.1. Разработана методика и оборудование для:
    - 5.4.2. Установлено (табл. 5.3) что:
6. Определение трения осевого подшипника 8208
  - 6.1. Теория эксперимента
    - 6.1.1. Установка рис. 1.2 для определения момента
    - 6.1.2. Схема установки для испытаний (рис. 6.1)
    - 6.1.3. Определение момента сопротивления
    - 6.1.4. Определение коэффициента сопротивления качению ОПК
    - 6.1.5. Определение коэффициента трения
  - 6.2. Техника и методика эксперимента
    - 6.2.1. Установка
    - 6.2.2. Порядок испытаний
    - 6.2.3. Порядок обработки результатов:
  - 6.3. Реализация эксперимента
    - 6.3.1. Исходные данные
    - 6.3.2. Расчеты для примера  $Q = 1000$  кг:
    - 6.3.3. Аналогично для нагрузки  $Q = 3000$  кг
    - 6.3.4. Результаты определения характеристик
- Основные результаты и выводы по п. 6.
7. Новый метод определения адгезионной и деформационной компонент напряжений трения
  - 7.1. Теория эксперимента.
    - 7.1.1. Деформирование пластической плоскости
    - 7.1.2. Качение с малым проскальзыванием
    - 7.1.3. Формулировка способа суммарно может быть сформулирована так:
  - 7.2. Техника эксперимента
    - 7.2.1. Схема приспособления к прессу Бринелля
    - 7.2.2. Кинематика процесса
  - 7.3. Реализация эксперимента

## 7.3.1. Варианты экспериментов

7.3.2. Результаты испытаний предоставлены в таблице 7.1.

7.3.3. Методика и результаты определения адгезионной компоненты  $\tau_A$ 

Основные результаты и выводы по подразделу 7

Литература

**4. Кинематическая вязкость пластического течения металлической поверхности трения в мягком режиме скольжения****4.1. Теория эксперимента**4.1.1. *Аналогия сдвига металла и жидкости шариком и сдвига жидкости между шариком и плоскостью*

1) возможны два механизма сдвига металла шариком: 1) при параллельном движении шарика, которое подробно рассмотрено в п. 3. Это движение возможно только в случае, если в специальном приспособлении ограничен подъем индентора;

2) если подъем индентора не ограничен, то при горизонтальном движении возникает значительная вертикальная сила, вызывающая подъем шарика, это движение напоминает глиссирование шарика в жидкости;

3) эта аналогия наталкивает на мысль, что между течением жидкости и пластическими деформациями металла имеется аналогия механизмов, закономерностей и моделей движения.

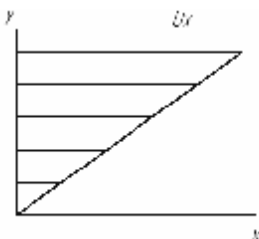
4.1.2. *Закон Ньютона для течения слоя жидкости*

приближенно для тонкого слоя имеет вид:

$$\tau = \mu \frac{dv_x}{dy} ; \tau = \mu \frac{v_{x1}}{h} , \quad (4.1)$$

$\tau$  [кг/мм<sup>2</sup>] – сдвиговое напряжение между слоями;  $v_{x1}$  [мм/с] – скорость верхнего слоя жидкости;  $h$  [мм] – толщина слоя жидкости;

$$\mu \frac{\tau \cdot h}{v_{x1}} \left[ \frac{\text{кгс} \cdot \text{мм} \cdot \text{сек}}{\text{мм}^2 \cdot \text{мм}} \right] = \left[ \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} \text{сек} \right] , \quad (4.2)$$

Рис. 4.1 – Схема скоростей при течении тонкого ( $h$ ) слоя жидкости

3)  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости жидкости или коэффициент пропорциональности между напряжением сдвига  $\tau$  и градиентом скорости слоев в смазке;

4) кинематический коэффициент вязкости  $\nu$ 

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} ,$$

где  $\rho$  – плотность металла;  $\rho = \frac{\text{кг}}{\text{мм}^3} = \frac{\text{кгс}}{9810 \text{ мм} \cdot \text{мм}^3} = \frac{\text{кгс} \cdot \text{сек}^2}{9810 \text{ мм}^4}$ ,

$$\nu = \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}}{\text{мм}^2} \cdot \frac{9810 \cdot \text{мм}^4}{\text{кгс} \cdot \text{сек}^2} = \frac{\text{мм}^2 \cdot 9810}{\text{сек}^3} ,$$

$$\mu = \frac{\tau \cdot h}{\nu} , \quad (4.4)$$

4.1.3. *Геометрия сдвига слоя поверхности металла шариком*

1) этап 1 – шарик вдавливаются в металл силой  $Q_0$  с образованием лунки радиусом  $a$ , диаметром  $d_0$ ,  $d_0 = 2a_0$  и глубиной  $u_0$ , (рис. 4.2);

2) этап 2 – прикладывается касательная сила  $F_D$ ; часть слоя сдвигается под углом  $\Delta\varphi$ , а шарик поднимается на высоту  $\Delta h$ ;

3) этап 3 – шарик сдвигается по площади  $\pi d_0^2 / 4$  на величину  $d_0$ ; при этом центр шарика поднимается на высоту  $h$ ; а нижняя точка контакта выходит на горизонтальную плоскость шириной  $d_k = 2a_k$ .

#### 4.1.4. Постановка задачи

**Задача состоит в определении** высоты подъема центра шарика от всплывания при деформировании металлической поверхности.

1) это не простая геометрическая задача;

2) проще всего ее определить экспериментально, замерив вертикальную координату точек  $A_k$  и  $A_0$ :

$$h = h_{Ak} - h_{A0}; \quad (4.5)$$

3) более просто, но приближенно величину подъема шара  $h$  можно определить, замерив, горизонтальный путь подъема  $l_A$  и определив угол подъема  $\alpha$  из соотношения:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{u_{w1}}{a}; \quad (4.6)$$

4) тогда высота подъема будет равна:

$$h = l_A \operatorname{tg} \alpha = l_A \frac{u_{01}}{a}; \quad (4.7)$$

5) глубину вдавливания  $u_{01}$  через диаметр отпечатка  $d = 2a$ :  $u_{01} = \frac{1}{2}(D - \sqrt{D^2 - (d)^2})$ , или

$$u_{01} = \frac{D}{2}(1 - \sqrt{1 - d^2 / D^2}). \quad (4.8)$$

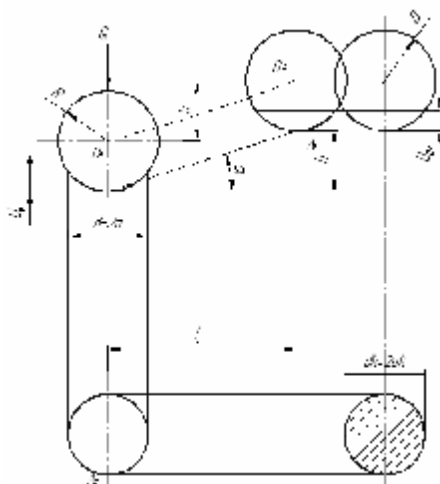


Рис. 4.2 – Схема геометрии сдвига шарика

#### 4.1.5. Приближенный сдвиговой закон пластического течения

Поверхности металла жестким шариком (без ограничения всплыванию шарика):

1) в 4.1.2 показано, что для тонкого слоя приближенно закон течения жидкости записать в виде:

$$\tau_T = \mu_T \frac{v_1}{h}, \quad (4.9)$$

отсюда имеем динамическую вязкость:

$$\mu_T = \frac{\tau_T \cdot h}{v_1}; \quad (4.10)$$

2) при известных значениях  $h$  [мм],  $v_1 = \frac{\text{мм}}{\text{с}}$ ,  $\tau_T \left[ \frac{\text{КГС}}{\text{мм}^2} \right]$ ,

размерность динамической вязкости:  $\mu_T = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{мм} \cdot \text{с}}{\text{мм}^2 \cdot \text{мм}} \right] = \left[ \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} \text{сек} \right],$

$$3) \text{ кинематическая вязкость: } \nu = \frac{\mu_T}{\rho} \left[ \frac{\text{кгс} \cdot \text{сек}}{\text{мм}^2} \right] = \left[ \frac{\text{мм}^3}{\text{кг}} \right] = \frac{\text{мм}^2 9810}{\text{сек}}.$$

## 4.2. Техника эксперимента

### 4.2.1. Приспособление к прессу Бринелля

- 1) соответствует описанным в п. 3.2;
- 2) однако, при испытаниях в этой работе убираются стержни ограничивающие всплыванием шарика.

### 4.2.2. Порядок испытаний:

- 1) задать нормальную нагрузку  $Q$ ;
- 2) приложить и замерить максимальную касательную нагрузку  $F_e$ ;
- 3) разобрать приспособление;
- 4) измерить диаметр  $d_0$  лунки при нормальной нагрузке  $Q$ ;
- 5) измерить ширину желоба  $d_k$  в конце сдвига;
- 6) измерить длину линии подъема шарика.

## 4.3. Реализация эксперимента

### 4.3.1. Исходные данные

- 1) нагрузка  $Q = 500$  кг; на 3 шарика;
- 2)  $D = 12,7$  мм;
- 3) результаты испытаний представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

| Результаты испытаний |            |     |            |            |                               |
|----------------------|------------|-----|------------|------------|-------------------------------|
| $Q$ , кг             | $F_e$ , кг | $d$ | $l_A$ , мм | $d_k$ , мм | $\tau_T$ , кг/мм <sup>2</sup> |
| 500                  | 6,3        | 1,9 | 2,5        | 1,5        | 24,0                          |

### 4.3.2. Обработка результатов испытаний

- 1) определим начальную глубину вдавливания шарика по (4.8):

$$u_{01} = \frac{12,7}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1,9}{12,7} \right)^2} \right) = 0,07146 \text{ мм};$$

$$2) \text{ tg} \alpha = \frac{0,07146}{0,95} = 0,07522 = 4,3^\circ;$$

- 3) высота подъема по (4.7) равна:  

$$h = 2,5 \cdot 0,07522 = 0,3335 \text{ мм}.$$

### 4.3.3. Определение $\tau_T$ с учетом п. 3.3

$$\tau_T = \frac{F_{1u}}{\pi a^2} = \frac{68,6}{\pi (1,9/2)^2} = 24 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}.$$

### 4.3.4. Определение динамической вязкости стали при пластическом течении

В формулу (4.10):

$$\mu_T = \frac{\tau_T \cdot h}{v_1},$$

подставив  $h = 0,32$  мм;  $v_1 = 2$  мм/сек, при  $\tau_T = 24$  кг/мм<sup>2</sup>:

$$\mu_T = \frac{24 \text{ кг/мм}^2 \cdot 0,32 \text{ мм} \cdot \text{сек}}{2 \text{ мм}},$$

или

$$\begin{aligned} \mu_T &= 3,84 \frac{\text{кгс} \cdot \text{мм} \cdot \text{сек}}{\text{мм}^2 \cdot \text{мм}}, \\ \mu_T &= 3,84 \frac{\text{кгс} \cdot \text{сек}}{\text{мм}^2}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

#### 4.3.5. Определение кинематической вязкости стали (при течении)

По определению кинематическая вязкость:

$$v_T = \frac{\mu_T}{\rho}, \quad (4.12)$$

где  $\rho$  — плотность стали:

$$\rho = 7,8 \frac{\text{кг}}{\text{дм}^3} = 7,8 \cdot 10^{-9} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^3}, \quad (4.13)$$

для твердых сталей использовать выглаживание алмазом;  
(4.11) и (4.13)  $\rightarrow$  (4.12)

$$v_T = 3,84 \frac{\text{кгс} \cdot \text{сек}}{\text{мм}^2} \frac{\text{мм}^3}{7,8 \cdot 10^{-9} \text{ кг}}; \quad (4.14)$$

учтем, что кг массы и кгс силы связаны соотношением:

$$\text{кг} = \frac{\text{кгс} \cdot \text{сек}^2}{9810 \text{ мм}}, \quad (4.15)$$

(4.15)  $\rightarrow$  (4.14) получаем:

$$\begin{aligned} v_T &= 3,84 \frac{\text{сек}}{\text{мм}^2} \frac{\text{мм}^3}{7,8 \cdot 10^{-9} \text{ кг}} \frac{9810 \cdot \text{мм}}{\text{кгс} \cdot \text{сек}^2}, \\ v_T &= 3,84 \frac{9810}{10^{-9} \cdot 7,8} \frac{\text{мм}^2}{\text{сек}}, \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$v_T = 4,84 \cdot 10^{12} \frac{\text{мм}^2}{\text{сек}}, \quad (4.17)$$

Сталь 3  $v_T = 4,84 \cdot 10^{12} c_{\text{токс}} = 4,83$  тераСтокс (тСт):

$$v_T = 4,83 \text{ тСт} \cdot v_T = 4,83 \text{ тСт}.$$

#### 4.4. Основные результаты и выводы по п. 4

1. При пластическом сдвиге жесткого шарика по металлической поверхности возможны два вида сдвига;

1) горизонтальное движение с чистым сдвигом выполняется специальным ограничителем вертикального движения шарика от всплытия (жесткий режим);

2) криволинейный подъем шарика типа всплытие или глиссирование (мягкий режим)

2. При сдвиге шарика в мягком режиме, т.е. при всплывании шарика пластическую деформацию поверхности мягкого металла можно рассматривать как аналогию ньютоновского течения квази жидкости.

3. При рассмотрении пластического сдвига металла как течения квази жидкости по Ньютону:

1) были введены параметры этого движения: 1) напряжения предела пластичности  $\tau_T$  при сдвиге; 2) общая толщина слоя  $h$ ; 3) скорость сдвига верхней части слоя  $v_1$ .

4. В закон пластического течения металла как квази жидкости был введены параметры вязкости стали как квазижидкости:

1)  $\mu_T$  — динамическая вязкость пластического течения металла как квази жидкости;

2)  $v_T$  — кинематическая вязкость пластического течения металла, как квази жидкости.

5. Из рассмотрения приближенного закона Ньютона для пластического течения металла при деформировании шариком, как квази жидкости было получено выражение (4.10) для определения коэффициента динамической вязкости  $\mu_T$ .

6. Кинематическая вязкость  $\nu_T$  для пластического течения поверхности металла при сдвиге шариком было получено традиционным способом – делением на плотность металла (4.12).

7. Используя результаты испытаний стали 3 на сдвиг шариком по разработанной методике было установлено, что кинематическая вязкость стали 3 как квази жидкости равна:

$$\nu_T = 4,83 \cdot 10^{12} \text{ тСт или } \nu_T = 4,83 \text{ тСт.}$$

8. Таким образом, кинематическая вязкость металлов как квазижидкостей при пластическом сдвиге измеряется терастоксами  $10^{12}$  стоксов.

9. По полученным данным можно сделать вывод о возможности использовать: 1) вязкость металла как квазижидкую среду при пластическом сдвиге в качестве новой механической характеристики пластических деформаций металлов; 2) очевидно, коэффициент вязкости металла, как квази жидкости может быть использован при изучении процессов обработки металлов давлением; 3) чем ниже кинематический коэффициент кинематическая вязкость  $\nu_T$ , тем легче (меньшими силами) обрабатывается металл давлением.

10. Обращаем внимание на то, что общепринятая характеристика конструкционных материалов – ударная вязкость в размерности не имеет ни времени ни скорости и поэтому не соответствует понятию вязкости. Если учесть время разрушения при испытаниях на ударную вязкость, то можно придать этой характеристике более физичный смысл.

## 5. Износ граничной смазки и изменение адгезионной компоненты при реверсивном трении

### 5.1. Теория эксперимента

#### 5.1.1. Реверсивное движение контр тела

1) рассматривается контакт шара и сферической полости по схеме п. 2.1., разделенных слоем граничной смазки;

2) шаровый индентор нагружается вертикальной нагрузкой  $Q$ ;

3) после нагружения задается касательная окружная нагрузка  $F_e$  и совершается перемещение на угол  $+\Delta\phi$ ;

4) затем направление силы  $F_e$  меняется на противоположное и снова задается движение на угол  $\pm\Delta\phi$ ;

5) реверсивные движения многократно повторяются.

#### 5.1.2. Задача эксперимента

Задача состоит в изучении процесса изменения компоненты сил  $\tau_A$  трения, при реверсивном трении;

1) изменение сил происходит по причине изменения условий смазывания;

2) главная причина изменения сил трения – уменьшение толщины граничной масляной пленки;

3) фактически происходит износ толщины масляной пленки по механизму возвратно-вращательного движения типа «дворник стеклоочистителя»;

4) это движение имеют место во всех шаровых опорах подвески и рулевого управления автомобиля.

#### 5.1.3. Закономерности процесса:

1) как правило, с увеличением числа реверсивных движений сила  $F_e$  на рычаге возрастает вследствие уменьшения толщины масляного слоя.

2) основным уравнением процесса является закон Ньютона в форме (2.6):

$$\tau_A = \mu \frac{v}{h}; \quad (5.1)$$

3) полагая, что коэффициент вязкости  $\mu$  и скорость  $v$  не изменяются находим, что с изменением адгезионной компоненты  $\tau_A$ ,  $t_{A_0}$ ,  $t_{A_n}$ ....., толщина слоя определяется по зависимости:

$$\frac{h_n}{h_0} = \frac{\tau_{A_0}}{t_{A_n}} = \frac{F_{l_0}}{F_{l_n}}. \quad (5.2)$$

Например если  $F_{l_0} = 0,57$  кг;  $F_{l_{nln=400}} = 1,43$ , толщина пленки от 1 мкм уменьшается до

$$h_n = h_0 \frac{F_{l_0}}{F_{l_n}} = 1 \frac{0,57}{1,43} = 0,39 \text{ мкм.}$$

## 5.2. Техника эксперимента

### 5.2.1. Установка из подраздела 1.2.1

### 5.2.2. Порядок работы

- 1) смазать поверхность тонким слоем;
- 2) собрать установку;
- 3) задать нагрузку  $Q_1 = 187,5$  кг;
- 4) сделать первое реверсивное движение с измерением  $F_e$ ;
- 5) повторить измерение при 10 поворотах движением;
- 6) результаты записать в таблицу типа 5.1 - 5.5.

## 5.3. Реализация эксперимента

### 5.3.1. Исходные данные:

1) проведены испытания на износ пленки при реверсивном движении шара в сферической полости

- 1.1) при нагрузках  $Q_1 = 187,5$  кг;  $Q_2 = 500$  кг; ...  $Q_7 = 3000$  кг;
- 1.2) при разных количествах движений от  $n = 1$  до 400;
- 1.3) испытания проведены при следующих видах смазки:
  - графитная смазка;
  - литол – 24;
  - солидол;
  - литол – 24 с бронзовым порошком;
  - литол – 24 + бронзовый порошок + глицерин.

5.3.2. Фактические результаты испытаний представлены в табл. 5.1 - 5.5 и на рис. 5.1 - 5.5.

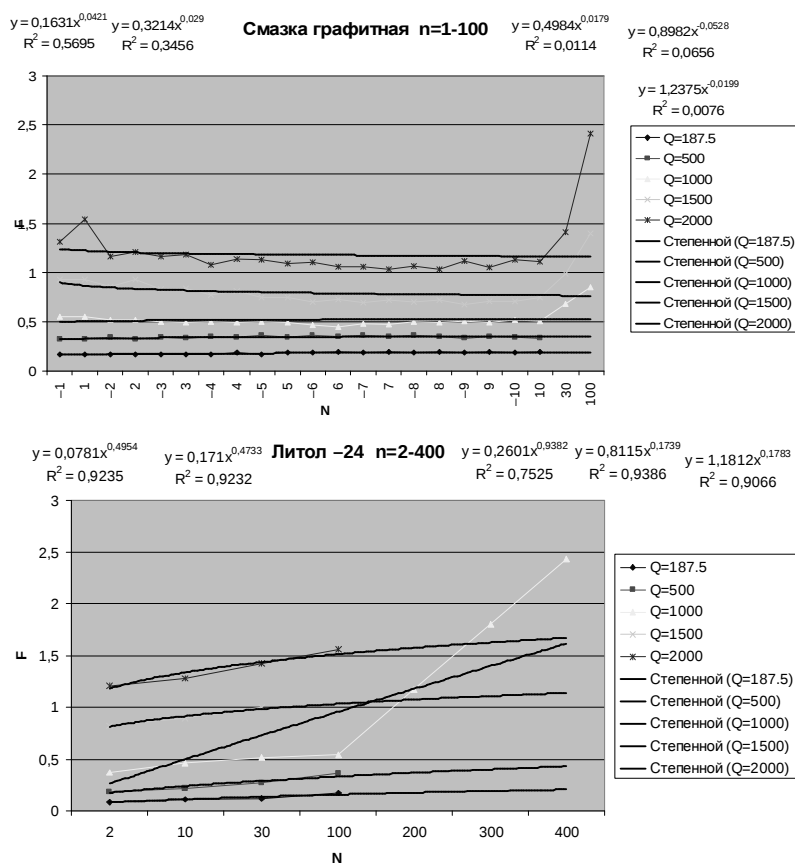


Таблица 5.1

**Смазка графитная  $n = 1 - 100$** 

|      |       |      |      |      |      |
|------|-------|------|------|------|------|
| -    | 187,5 | 500  | 1000 | 1500 | 2000 |
| - 1  | 0,17  | 0,32 | 0,55 | 0,93 | 1,31 |
| + 1  | 0,17  | 0,32 | 0,55 | 0,93 | 1,54 |
| - 2  | 0,17  | 0,34 | 0,52 | 0,86 | 1,16 |
| + 2  | 0,17  | 0,32 | 0,52 | 0,93 | 1,21 |
| - 3  | 0,17  | 0,34 | 0,50 | 0,83 | 1,16 |
| + 3  | 0,17  | 0,33 | 0,49 | 0,84 | 1,18 |
| - 4  | 0,17  | 0,35 | 0,50 | 0,77 | 1,08 |
| + 4  | 0,18  | 0,34 | 0,49 | 0,81 | 1,14 |
| - 5  | 0,17  | 0,36 | 0,50 | 0,74 | 1,13 |
| + 5  | 0,18  | 0,34 | 0,49 | 0,74 | 1,09 |
| - 6  | 0,18  | 0,36 | 0,46 | 0,70 | 1,10 |
| + 6  | 0,19  | 0,35 | 0,45 | 0,73 | 1,06 |
| - 7  | 0,18  | 0,36 | 0,48 | 0,69 | 1,06 |
| + 7  | 0,19  | 0,35 | 0,47 | 0,72 | 1,03 |
| - 8  | 0,18  | 0,36 | 0,50 | 0,70 | 1,07 |
| + 8  | 0,19  | 0,35 | 0,49 | 0,72 | 1,03 |
| - 9  | 0,18  | 0,33 | 0,51 | 0,67 | 1,12 |
| + 9  | 0,19  | 0,35 | 0,49 | 0,71 | 1,05 |
| - 10 | 0,18  | 0,34 | 0,52 | 0,71 | 1,13 |
| + 10 | 0,19  | 0,33 | 0,51 | 0,74 | 1,11 |
| + 30 | -     | -    | 0,68 | 0,99 | 1,41 |
| 100  | -     | -    | 0,85 | 1,40 | 2,41 |

Таблица 5.2

**Смазка солидол  $n = 2 - 100$** 

|     |       |      |      |      |      |
|-----|-------|------|------|------|------|
| -   | 187,5 | 500  | 1000 | 1500 | 2000 |
| 2   | 0,20  | 0,28 | 0,68 | 1,16 | 1,5  |
| 10  | 0,19  | 0,30 | 0,66 | 1,11 | 1,52 |
| 30  | 0,17  | 0,30 | 0,70 | 1,21 | 1,59 |
| 100 | 0,17  | 0,32 | 0,95 | 1,88 | 2,26 |

Таблица 5.3

**Литол – 24  $n = 2 - 400$** 

|     |       |      |      |          |      |
|-----|-------|------|------|----------|------|
| -   | 187,5 | 500  | 1000 | 1500     | 2000 |
| 2   | 0,08  | 0,18 | 0,37 | 0,820,86 | 1,21 |
| 10  | 0,11  | 0,22 | 0,46 | 0,89     | 1,28 |
| 30  | 0,12  | 0,27 | 0,51 | 1        | 1,42 |
| 100 | 0,17  | 0,36 | 0,54 | -        | 1,56 |
| 200 | -     | -    | 1,17 | -        | -    |
| 300 | -     | -    | 1,80 | -        | -    |
| 400 | -     | -    | 2,43 | -        | -    |

Таблица 5.4

**Литол – 24 + бронзовый порошок  $n = 2 - 100$** 

|     |       |      |      |      |      |
|-----|-------|------|------|------|------|
| -   | 187,5 | 500  | 1000 | 1500 | 2000 |
| 2   | 0,27  | 0,40 | 0,59 | 0,94 | 1,33 |
| 10  | 0,29  | 0,42 | 0,81 | 1,04 | 1,42 |
| 30  | 0,29  | 0,48 | 0,91 | 1,17 | 1,64 |
| 100 | 0,41  | 0,63 | 1,10 | 1,55 | 2,12 |

Таблица 5.5

**Литол – 24 + бронзовый порошок + глицерин  $n = 2 - 100$** 

|     |       |      |      |      |      |
|-----|-------|------|------|------|------|
| -   | 187,5 | 500  | 1000 | 1500 | 2000 |
| 2   | 0,18  | 0,38 | 0,74 | 1,09 | 1,33 |
| 10  | 0,18  | 0,40 | 0,93 | 1,14 | 1,47 |
| 30  | 0,18  | 0,43 | 0,98 | 1,36 | 1,53 |
| 100 | 0,20  | 0,48 | 1,78 | 1,89 | 2,20 |

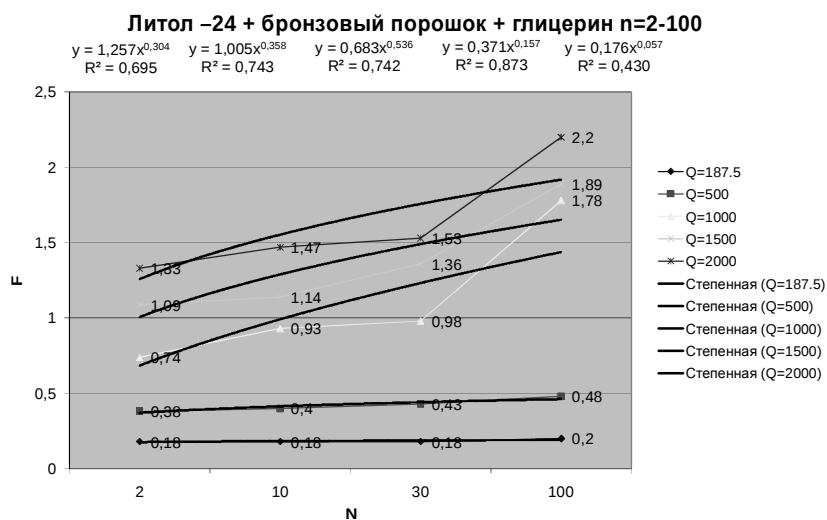
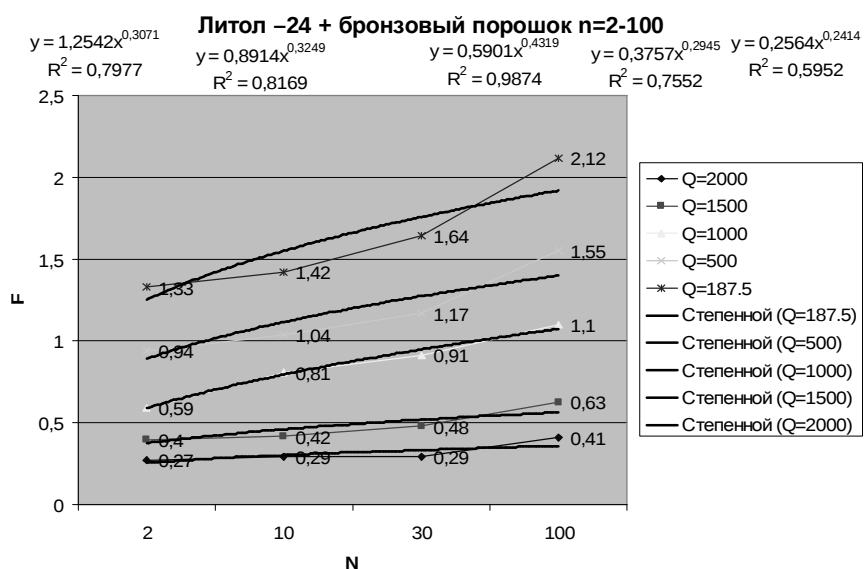
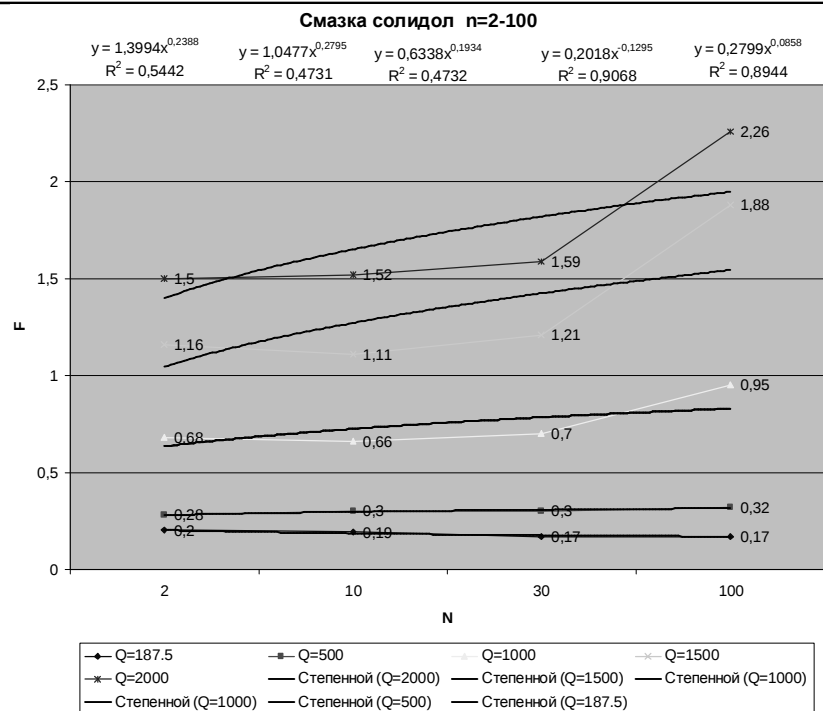


Таблица 5.6

Изменение силы трения за первые 100 качения при разных нагрузках при  $Q = 2000$  кг

| № п/п | Смазка                                    | $F_e^1 n = 1$ | $F_e^{100} n = 100$ | $F_e^{100} / F_e^1$ |
|-------|-------------------------------------------|---------------|---------------------|---------------------|
| 1     | Графитная ( $n = 10$ )                    | 1,31          | 1,12                | 0,93                |
| 2     | Графитная $n = 100$                       | 1,31          | 2,41                | 1,84                |
| 3     | Солидол $n = 100$                         | 1,5           | 2,26                | 1,51                |
| 4     | Литол – 24 $n = 100$                      | 1,24          | 1,56                | 1,26                |
| 5     | Литол – 24 + бронзовый порошок            | 1,33          | 2,12                | 1,6                 |
| 6     | Литол – 24 + бронзовый порошок + глицерин | 1,33          | 2,2                 | 1,65                |

#### 5.4. Основные результаты и выводы по п. 5

##### 5.4.1. Разработана методика и оборудование для:

1) изучения зависимости сил трения в смазанном контакте от числа реверсивных движений поверхностей;

2) изучения зависимости толщины (износа) граничной смазки от числа реверсивных движений для разных видов смазки.

##### 5.4.2. Установлено (табл. 5.3) что:

1) в течение первых 100 циклов при общей нагрузке 2000 кг 100 реверсивных качаний для выбранных смазок сила трения повышается в 1,26 - 193 раза;

2) в соответствии с этим результатом можно приблизительно полагать, что в такой степени уменьшается толщина масляной граничной пленки смазки;

3) добавка бронзового порошка в литол-24 увеличивает силу трения приблизительно в 1,35 раза, при этом добавка глицерина практически не снижает, а напротив повышает силу трения.

5.4.3. Одним из наиболее важных результатов в применении предложенной методики можно считать методику оценки изменения толщины граничной смазки при реверсивном движении контактирующих поверхностей.

#### 6. Определение трения осевого подшипника 8208

##### 6.1. Теория эксперимента

6.1.1. Установка рис. 1.2 для определения момента трения сцепления  $M$  часть внешнего момента воспринимается сферической поверхностью  $M_A$ , а часть МПК идет на преодоление трения в подшипнике качения 3 рис. 6.2.

$$M = M_A + M_{ПК}. \quad (6.1)$$

С целью увеличения точности определения  $\sigma_A$  в данной работе производится определение момента трения в подшипнике качения  $M_{ПК}$ .

##### 6.1.2. Схема установки для испытаний (рис. 6.1)

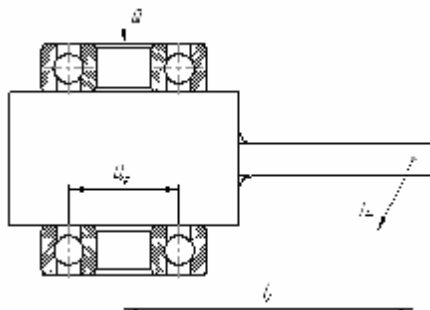


Рис. 6.1 – Схема установки для испытаний

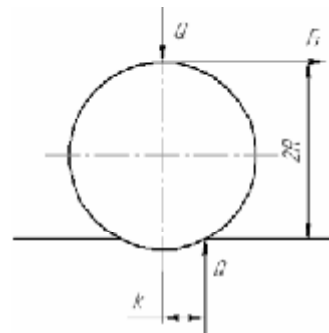


Рис. 6.2 – Схема качения шара

##### 6.1.3. Определение момента сопротивления осевого подшипника ОПК при действии силы $F_{TP}$ .

1) внешний момент  $M$  равен:

$$M_{2ПК} = F_{ПК} \cdot l_2; \quad (6.2)$$

2) на каждый подшипник приходит половина момента:

$$M_{ПК} = 1/2 F_2 \cdot l_2. \quad (6.3)$$

#### 6.1.4. Определение коэффициента сопротивления качению ОПК

- 1) под коэффициентом трения обычно понимают величину;
- 2) силу сопротивления качению определяем из условия равновесия:

$$F_{TP} \cdot 2R = Qk, \quad (6.4)$$

отсюда имеем

$$k = \frac{2F_{TP}R}{Q_k}, \quad (6.5)$$

где  $k$  — коэффициент сопротивления качению имеет размерность длины;

3) коэффициент сопротивления качению в форме (6.5) неудобен тем, что он имеет размерность, а главное зависит от радиуса шара  $R$ ; чем больше радиус, тем больше коэффициент;

4) чтобы избежать этого недостатка, представим соотношение (6.5) в безразмерном виде, разделив левую и правую части на  $R$ :

$$f_k = \frac{k}{R} = \frac{2F_{TP}}{Q}; \quad (6.6)$$

5) в этом выражении величина  $f_k = k/R$  безразмерная не зависящая от радиуса называется коэффициентом трения качения и является характеристикой пары трения качения.

6.1.5. Для определения коэффициента трения качения  $f_k$  необходимо знать нормальную нагрузку  $Q$  и силу качения  $F_k$ ;

- суммарная нормальная сила, действующая на все шарики равна  $Q$ . Как в одном, так и другом подшипниках;

- суммарная касательная сила, приходящаяся на все шарики равна:

$$F_{ш} = \frac{M_{нк}}{D_{иср}}, \quad (6.7)$$

где  $D_{иср}$  — диаметр дорожки качения шариков.

## 6.2. Техника и методика эксперимента

6.2.1. Установка. Приспособление, выполненное по схеме рис. 6.1 монтируется на винте прессы Бринелля.

- 1) нагрузка, задается ступенчато от 187,5 кг до 3000 кг;
- 2) при заданной нагрузке с помощью динамометра измеряется сила  $F_{нк}$  на рычаге;
- 3) фиксируются условия на шариках, вид смазки или без смазки;
- 4) измеряется размер  $D_{ср}$  по дорожке качения.

#### 6.2.2. Порядок испытаний

- 1) для каждой заданной вертикальной нагрузки на прессе измеряется сила  $F_{нк}$  поворота подшипников;
- 2) результаты испытаний заносятся в табл. 6.1;
- 3) измерить величину  $D_{ср}$ .

Таблица 6.1

| Результаты испытаний |          |               |          |        |                             |
|----------------------|----------|---------------|----------|--------|-----------------------------|
| № п/п                | $Q$ , кг | $F_{нк}$ , кг | $F_{TP}$ | $f_k$  | $F_A = F - F_{нк} / 2$ , кг |
| 1                    | 187,5    | -             | -        | -      | -                           |
| 2                    | 500      | -             | -        | -      | -                           |
| 3                    | 1000     | 0,36          | 2,133    | 0,0067 | 1,59                        |
| 4                    | 1500     | 0,43          | -        | -      | 2,085                       |
| 5                    | 2000     | 0,76          | -        | -      | 2,39                        |
| 6                    | 2500     | 1,0           | -        | -      | 2,8                         |
| 7                    | 3000     | 1,80          | 10,67    | 0,0071 | 3,85                        |

**6.2.3. Порядок обработки результатов:**

- 1) определить по (6.6) суммарную касательную силу  $F_{ш}$ , действующую на все шарики;
- 2) по (6.5) определить коэффициент сопротивления качению в осевом ПК;
- 3) по (6.6) определить коэффициент трения качения в осевом подшипнике качения.

**6.3. Реализация эксперимента****6.3.1. Исходные данные**

- 1) осевой подшипник ОПК типа 8208;
- 2) средний диаметр по телам качения:  $D_{cp} = 108$  мм;  $R = 54$  мм;
- 3) диаметр шариков качения:  $D_w = 10,32$  мм;  $R = 5,16$  мм.
- 4)  $l_2 = 320$  мм.

**6.3.2. Расчеты для примера  $Q = 1000$  кг:**

- 1) суммарная касательная сила  $F_{шк}$  при силе на рычаге 0,36 кг по (1.7):

$$F_{ш} = \frac{M_{шк}}{d_{шкр}} = \frac{F_{шр} \cdot l_2}{d_{шкр}} = \frac{0,36 \text{ кг} \cdot 320 \text{ мм}}{54 \text{ мм}},$$

$$F_{ш} = \frac{0,36 \cdot 320}{54} = 2,133 \text{ кг};$$

- 2) коэффициент сопротивления качению по (1.5):

$$k = \frac{2F_{ш} \cdot R}{Q} = \frac{2,133 \cdot 5,16}{1000} = 0,011 \text{ мм};$$

- 3) коэффициент трения качения по (1.6):

$$f_k = \frac{2 \cdot 2,133}{1000} = 0,0067.$$

**6.3.3. Аналогично для нагрузки  $Q = 3000$  кг**

- 1)  $F_{cp} = \frac{1,8 \cdot 320}{54} = 10,67$  кг;
- 2)  $k = \frac{2 \cdot 10,67 \cdot 5,16}{3000} = 0,0367$  мм;
- 3)  $f_k = \frac{2 \cdot 10,67}{3000} = 0,0071$  кг;

**6.3.4. Результаты определения характеристик при других нагрузках приведены в табл. 6.1.****Основные результаты и выводы по п.6.**

1. Разработана методика определения сопротивления вращению осевого подшипника при разных нагрузках.
2. Разработанная методика включает:
  - 1) как основное оборудование пресс Бринелля;
  - 2) специально разработанное приспособление из двух подшипников 8208;
  - 3) методику измерения.
3. Разработанная методика реализована применительно к подшипнику 8208
3. Коэффициент трения качения для ПК 8208 при нагрузке  $Q = 3000$  кг получен равным 0,0071.
4. По отношению к главным задачам этой работы данный подраздел носит вспомогательный характер.

**7. Новый метод определения адгезионной и деформационной компонент напряжений трения****7.1. Теория эксперимента**

- 7.1.1. Отличие от способа, изложенного в п.п. 1.3 в данном подразделе рассматривается деформирование пластической плоскости катящимся шариком.

1) в общей теории Крагельского деформационной компоненты трения, вид трения не учитывается как в одном, так и другом случае получено выражения для коэффициента трения:

$$f_D = 0,55 \sqrt{\frac{U_0}{R}}; \quad (7.1)$$

2) в данной работе ставится задача получить экспериментально значение  $f_D^{кач}$  при качении шарика и сравнить его с  $f_D^{ск}$ , полученного при скольжении (п. 3).

7.1.2. Качение с малым проскальзыванием здесь рассматривается, как способ убрать (уменьшить) адгезионную компоненту трения, учитывая, что

1) в общем случае:

$$F_{ck} = F_A + A_D; \quad (7.1)$$

2) в методе Михина при определении адгезионной компоненты максимально уменьшена деформационная компонента  $F_D \rightarrow 0$ , тогда измеряемое  $F^{ck}$  трения приближенно, равна адгезионному:

$$(F^{ck} = F_A); \quad (7.2)$$

3) в рассматриваемом далее способе деформирования плоскости шариком при качении минимизируется адгезионная компонента  $F_A \rightarrow 0$  так, что из (7.1) имеем:

$$F^{кач} = F_D^{кач}; \quad (7.3)$$

4) сила сопротивления качению приближается к истинной деформационной составляющей.

Для определения адгезионной компоненты необходимо из полной силы трения, полученной при скольжении шарика вычесть деформационную компоненту:

$$F_A = F_{ck} - F_D^{кач}. \quad (7.4)$$

7.1.3. Формулировка способа суммарно может быть сформулирована так:

1) определить сопротивление качению шарика пластически деформирующей плоскостью силой  $F_D^{кач}$ ;

2) определить попутную силу трения  $F^{ck}$  при пластическом скольжении шарика по плоскости с образованием желоба;

3) в итоге адгезионная сила  $F_A$  может быть определена (по 7.4), как:

$$F_A = F^{ck} - F_D^{кач}. \quad (7.5)$$

## 7.2. Техника эксперимента

### 7.2.1. Схема приспособления к прессу Бринелля

1) приспособление базируется на осевом подшипнике качения одно кольцо, в котором 1 заменяется образцом для пластической обкатки шариком;

2) за основу возьмем приспособление, использованное в подразделе 3;

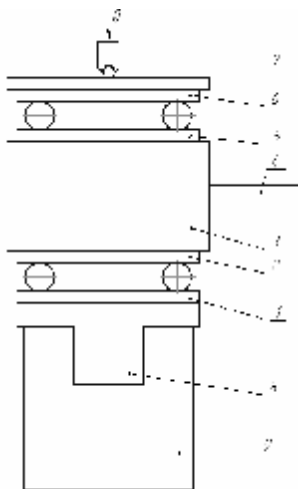


Рис. 7.1 – Схема приспособления к прессу Бринелля

3) верхнее кольцо ОПК 2 поворачиваясь увлекает по касательной шарик, который будучи вдавленным в поверхность испытываемого кольца 2 деформирует его образовывая желоб.

### 7.2.2. Кинематика процесса

При рассмотрении дальнейшей механики возникает вопрос: 1) будет ли шарик далее катиться, пластически деформируя плоскость, или будет вращаться вокруг своей оси (рис. 7.2); 2) ответ на этот вопрос следует из рассмотрения уравнения равновесия шарика:

$$M_A = F^{кач} 2R - F u_0 - Q_a - F^{ск} \vartheta = 0. \quad (7.6)$$

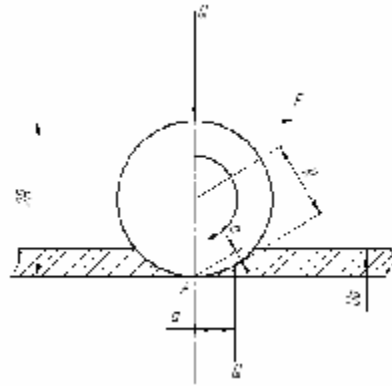


Рис. 7.2 – Схема пластического качения шарика

## 7.3. Реализация эксперимента

### 7.3.1. Варианты экспериментов

В соответствии с методикой испытания были проведены следующие варианты испытаний:

**I.** 1) качение осевого шарикоподшипника ОПК по плоскости кольца с пластическими деформациями;

2) исходные данные ОПК тип 8308 число шариков 15 диаметр шарика  $D = 10$  мм, и средний диаметр дорожки качения  $d_{cp} = 55$  мм.

**II.** 3) скольжение трех жесткозакрепленных шариков по плоскости кольца из стали 3 (п.3);

4) в верхней части расположен осевой подшипник качения;

5) движения в вертикальном направлении рабочих шариков ограничено тремя стержнями.

**III.** 6) пластическое скольжения 3-х жесткозакрепленных в корпусе шариков по плоскости без ограничения вертикального перемещения шариков (п. 4).

### 7.3.2. Результаты испытаний предоставлены в табл. 7.1

Таблица 7.1

| Результаты испытаний                                                                                                                                              |       |          |             |             |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------|-------------|-------------|-----------|
| <b>I. Качение подшипника 3208 передача загрузки при верчении в верхней части приспособления</b>                                                                   |       |          |             |             |           |
| $Q$                                                                                                                                                               | $F_1$ | $R$ , мм | $D = 10$ мм | $2a = d$ мм | $Z$ , шар |
| 500                                                                                                                                                               | 0,63  | 55       | 10          | 0,9         | 15        |
| <b>II. Скольжение по полости закрепленных шаров с ограничением движения в вертикальном направлении, с ПК в верхней части (три шарика)</b>                         |       |          |             |             |           |
| $Q$                                                                                                                                                               | $F_1$ | $R$ , мм | $D = 15$ мм | $2a = d$ мм | $Z$ , шар |
| 500                                                                                                                                                               | 8,1   | 60       | 15          | 1,9         | 3         |
| <b>III. Пластическое скольжение по плоскости 3-х закрепленных шаров без ПК в верхней нагружающей части, без ограничителей движения в вертикальном направлении</b> |       |          |             |             |           |
| $Q$                                                                                                                                                               | $F_1$ | $R$ , мм | $D = 15$ мм | $2a = d$ мм | $Z$ , шар |
| 500                                                                                                                                                               | 6,3   | 60       | 15          | 1,6         | 3         |

### 7.3.3. Методика и результаты определения адгезионной компоненты $\tau_A$

1) определение полной величины сила  $F = F_d + F_A$  и трения по результатам испытаний при скольжении трех жесткозакрепленных шариков по схеме;

2) касательная сила на шариках при скольжении определяется по методике работы п. 3:

$$F_l \cdot L = 3 \cdot F_{ш} \frac{d_{cp}}{2}, \quad (7.7)$$

$$F_{ш} = \frac{2F_l L}{3d_{cp}} = \frac{2 \cdot 8,1 \cdot 320}{3 \cdot 60} = 28,8 \text{ кг};$$

3) напряжения сдвига или полного трения:

$$r = \frac{F_{ш}}{\pi a^2} = \frac{28,8}{\pi \cdot 1,9^2} = 4,82 \text{ кг/мм}^2,$$

где  $a$  — половина ширины следа сдвига.

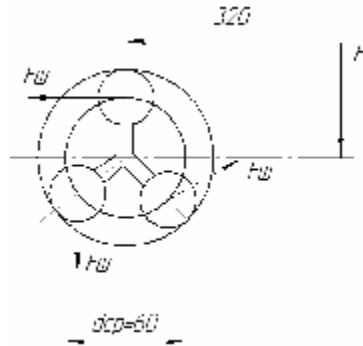


Рис. 7.3 – Схема II

Определения деформационной компоненты напряжения трения по результатам испытаний при пластическом качении шаров ОПК 208:

1) определения касательной силы на шариках  $F_{ш}$ :

$$F_l \cdot L = F_{ш} \frac{d_{cp}}{2} 15, \quad (7.8)$$

$$F_{ш} = \frac{2F_l L}{d_{cp} 15} = \frac{2 \cdot 0,63 \cdot 320}{55 \cdot 15} = 0,488 \text{ кг}; \quad (7.9)$$

2) деформационная компонента напряжения трения  $\tau_D$ :  $r_D = \frac{F_{ш}}{\pi a^2} = \frac{0,488}{\pi \cdot 0,9^2} = 0,193 \text{ кг/мм}^2$ ;

3) адгезионная компонента трения:  $\tau_A = \tau - \tau_D = 4,82 - 0,193 = 4,63$ ;

4) соотношение между адгезионной и деформационной составляющей:  $\frac{\tau_A}{\tau_D} = \frac{4,63}{0,193} = 24$ , что

соответствует диапазону известим справочным данным.

### Основные результаты и выводы по подразделу 7

1. Разработан и реализован новый метод определения адгезионной компонента  $F_A$  силы трения.

1) метод основан на допущении, что адгезионная составляющая сил трения  $F_A$  при пластическом качении шарика пренебрежимо мала по сравнению с деформационной силой  $F_D$  при качении:

$$F_A \ll F_D; \quad (7.10)$$

2) полная сила трения  $F$  при пластическом скольжении равна сумме адгезионной  $F_A$  и деформационной  $F_D$ :

$$F = F_D + F_A; \quad (7.11)$$

3) при наличии  $F$  и  $F_D$  адгезионная составляющая определяется из:

$$F_A = F - F_D. \quad (7.12)$$

2. Экспериментальная реализация показала эффективность и достаточную точность, и допустимость предложенного метода.

### Заключение о развитии и суммировании методов исследования адгезионно-деформационной теории трения

Чтобы привлечь внимание специалистов по трибологии к методам и результатам исследования МДД ТТ, изложенным в этой работе сразу дам свою авторскую оценку значимости полученных результатов:

- по моему мнению, это наиболее сильные результаты, полученные автором за последние 5 - 10 лет в области трибологии.

Работа содержит 7 основных мыслей, как алгоритмов или планов действий, и последующие реализацию и анализ результатов осуществления этих мыслей.

Из краткого анализа сущности адгезионно-деформационной теории трения следует базовый характер этой теории для всей трибологии.

В связи с этим экспериментальное определение основных параметров этой теории: адгезионной  $\tau_A$  и деформационной  $\tau_D$  компонент напряжения трения – является изначально важной и трудной задачей.

Трудность состоит прежде всего в том. Что эти компоненты соединены в суммарном эффекте в трении.

Предложение Михина Н.М., и Крагельского И.В. минимизировать деформационную составляющую за счет использования максимально гладких поверхностей было реализовано в методе верчения гладкой сферы в сферической полости.

При этом сферическая полость создавалась пластическим вдавливанием шара в плоскость при некоторой нагрузке сразу следующим за этим верчением шара.

#### 1. Метод большой лунки и твердость граничной смазки

1.1. Первая мысль, которая высказана и реализована в подразделе 1 заключается в том, что бы сферическая полость достаточно больших размеров была получена заранее путем вдавливания большого шарика, например ( $d = 30$  мм) при  $Q = 50$  т.

Заранее выполненная большая лунка позволяет проводить опыты по определению адгезионной компоненты в широком диапазоне давлений. Это дает возможность получать зависимости компонент трения от давления также в широком диапазоне давлений.

1.2. По результатам испытаний определяют адгезионную компоненту напряжения трения  $\tau_A$ . При наличии граничной смазки адгезионную компоненту напряжения трения можно рассматривать как предел текучести граничной смазки при сдвиге  $\tau_T$ :

$$\tau_A = \tau_T^{TC}, \quad (1,a)$$

это можно сказать вторая мысль.

1.3. Далее следует мысль о развитие мыслей:

1) Мысли развивается как живые существа по законам только им (мыслям) известным: 2) это не просто или не только законы логики, это законы развития материи и духа. При этом используются законы из самых разных областей знаний, так как все они есть законы разных сторон материи (по существу здесь работает всеобщий метод аналогий).

Из теории прочности твердых тел известно, что: 1) предел текучести на сдвиг  $\tau_T$  и предел текучести на сжатие  $\sigma_T$  при определенных условиях связаны соотношением:

$$\sigma_T = 2\tau_T - 2\tau_A, \quad (1,b)$$

3) следующая мысль состоит в использовании этого соотношения для описания деформаций граничной смазки.

1.4. Далее вспоминаем, что известны: 1) многочисленные аппроксимации между пределом текучести на сжатие и твердостью материалов; 2) наиболее простая зависимость в этом случае имеет вид [7];

$$HB \approx 3\sigma_T; \quad (1,c)$$

3) подставляя (1,b) в (1,c) получаем, что приближенно твердость граничной смазки выражается через адгезионную компоненту напряжения трения по соотношению:

$$HB^{TC} \approx 6\tau_A. \quad (1,d)$$

1.5. Для примера для графитной:

1) смазки при давлении  $\sigma = 0,826$  кг/мм<sup>2</sup> адгезионная компоненты  $\tau_A = 0,117$  кг/мм<sup>2</sup>, а твердость граничного слоя графитной;

2) смазки оценивается величиной:

$$HB^{TC} \approx 6\tau_A = 0,702 \text{ кг/мм}^2;$$

3) а при давлении  $\sigma = 1,182$  кг/мм<sup>2</sup>:

$$HB^{TC} = 7,092 \text{ кг/мм}^2.$$

1.6. И уж совсем сверхинтересно было для меня узнать, что твердость олова и свинца равны:

$$HB^{sn} = 5 \text{ кг/мм}^2, \quad HB^{Pb} = 4 \text{ кг/мм}^2.$$

1.7. Таким образом, твердость тонкого (1 мкм) граничного слоя графитной смазки практически такая же, как твердость свинца или олова.

1.8. То есть: 1) интуитивно ощущаемое повышение твердости смазки в условиях граничной смазки; 2) многократно высказываемая трибологами в данной работе находит количественную и научно обоснованную оценку; 3) это то, что здесь я называю сильным результатом.

1.9. Полученное значение о механических свойствах слоя граничной смазки может использоваться:

- 1) для построения механизма и модели изнашивания граничной смазки;
- 2) для построения теории и практики конструирования смазочных микроканалов и т.д.

## 2. Кинематическая вязкость граничной смазки

2.1. Вязкость: 1) практически основная механическая характеристика материала смазки.

2) известно несколько стандартизованных методов определения динамической и кинематической вязкости смазки в объеме;

3) практическое использование коэффициентов или характеристик вязкости смазок ограничено их ориентировочным выбором на стадии конструирования узлов трения;

4) существенного влияния на выбор смазок по износостойкости объема вязкости не имеет.

2.2. Для оценки износостойкости смазанной пары трения: 1) полезно знать вязкость тонкого граничного слоя смазки;

2) однако, в настоящее время нам не известны методы определения этой вязкости.

2.3. Традиционно методы определения вязкости смазки: 1) получают исходя из закона Ньютона течения жидкости:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dn}, \quad (2,a)$$

$$\tau_A = \mu \frac{v}{h}; \quad (2,b)$$

2) возникает первая мысль нельзя ли построить метод определения динамической вязкости записав закон Ньютона для слоя смазки предельно малой толщины.

2.4. Реализация этой мысли происходит через несколько допущений или предельных переходов:

1) полагаем  $h = 1 \text{ мкм} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$  приближенно на основе известных измерений толщины пленки в граничной смазке;

2) полагаем при реальных испытаниях скорость скольжения  $v = 1 \text{ мм/с}$ ;

3) эти допущения могут быть уточнены, а в нашем случае взяты такими для удобства;

4) с учетом принятых допущений из (2,в) находим выражение для определения динамической вязкости граничной смазки:

$$\mu = \tau_A \frac{h}{v} = \tau_A \frac{1}{1}. \quad (2,c)$$

2.5. Учитывая, что на практике большее применение имеет кинематическая вязкость  $\nu$ ;

1) делением динамической вязкости на плотность смазки  $\rho$ , из (2,с) имеем:

$$\nu = 9,81 \tau_A \approx 10 \tau_A; \quad (2,d)$$

2) в частности случая для графитной смазки при  $\sigma_{cp} = 8,810 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\tau_A = 0,784 \text{ кг/мм}^2$ , имеем:

$$\nu = 7,84 \text{ мм}^2/\text{с};$$

3) для сравнения с другими смазками необходимы дополнительные опыты и вычисления.

2.6. Таким образом: 1) полагаем, предложен и реализован метод оценки кинематической вязкости граничной смазки; 2) в сочетании с методом большой лунки представляется возможным изучить влияние давлений на вязкость граничной смазки.

## 3. Механика пластического скольжения шарика и определение деформационной компоненты $\tau_d$ напряжения трения

3.1. Опыты показывают, что после пластического вдавливания шара в плоскость силой  $N$  на глубину  $u_0$  и приложения касательной силы  $\tau_d$  возможны:

1) три вида механизмов движения центра шарика: центр шарика: а) опустится; б) будет двигаться горизонтально; в) будет подниматься или всплывать;

2) предсказать заранее и описать эти механизмы теоретически затруднительно.

3.2. 1) Для определения деформационной компоненты напряжения или силы трения  $\tau_d$ ; 2) и сравнивая ее с теоретической:

$$F_A = kN \sqrt{\frac{u_0}{R}}, \quad (3,a)$$

3) необходимо испытания проводить при значении глубины вдавливания шарика  $u_0$ ;

3.3. Эти специальные условия были обеспечены установкой распорных стержней, исключающих подъем центра шарика при пластическом сдвиге.

3.4. Установлено, что расхождение между теоретическим и экспериментальными значениями  $\tau_A$  достаточно велико. Это указывает на необходимость в дальнейшем совершенствования методики и повышения точности эксперимента.

#### 4. Вязкость пластического течения стали

4.1. Рассмотрение механики сдвига шарика с подъемом его центра наводит на мысль, о применимости понятия гидродинамического течения стали по закону Ньютона для жидкости:

$$\tau = \mu \frac{v}{h}. \quad (4,а)$$

4.2. Безусловно, рассмотрение этой аналогии носит: 1) весьма приближенный характер; 2) и базируется на геометрии сдвига слоя поверхности металла шариком.

4.3. Тем не менее, реализация этой мысли привела к интересному результату:

1) порядок кинематической вязкости стали 3 определен величиной  $\sim 5$  Терра Стоксов;

2) в определении этой величины возможны уточнения, но принципиально важно, что дана оценка вязкости стали как механической характеристики, связанной со скоростью пластического течения металла.

4.4. Учитывая, что; 1) известная для металлов динамическая вязкость как отношение работы разрушения к площади сечения не содержит ни скорости, ни времени процесса;

2) применение предложенной здесь кинематической вязкости стали как механической характеристики металла может быть использована при изучении процессов обработки металлов давлением.

#### 5. Износ граничной смазки при реверсивных движениях поверхностей

5.1. Все предыдущие эксперименты: 1) выполнены при однократном сдвиге по отношению  $\tau_A$  поверхностей;

2) в то же время в действительности многие узлы трения, например, такие как шаровые опоры работают при возвратно-вращательном или реверсивном движении;

3) это движение вызывает износ граничной смазки.

4) цель экспериментов в этом подразделе разработка методики испытаний в этих условиях и исследование закономерностей этого процесса.

5.2. Основные результаты исследований сводятся к следующим:

1) с увеличением числа возвратных движений от 1 до 100 для изученных вариантов смазок сила трения, а с ним и адгезионная компонента возросли в 1,26 - 1,93 раза, т.е. почти в 2 раза;

5.3. Следовательно, в соответствии с выражением закона Ньютона:

$$1) \tau_A = \mu \frac{v}{h}; \quad (5, а)$$

2) толщина масляной граничной пленки соответственно уменьшится за 100 движений приблизительно в 2 раза;

3) таким образом, мы имеем возможность косвенно через силы трения оценивать изменения толщины масляной пленки в данном случае от 1 мкм до 0,5 мкм.

5.4. В результате можно утверждать о разработке косвенной методики износа граничной смазки по величине адгезионной компоненты напряжения трения.

#### 6. Трение в осевом шарикоподшипнике

6.1. В связи с тем, что во всех предложенных методиках по определению компонентов трения используются как опорные узлы осевые подшипники, то для оценки точности необходимо знать потери, и трение в ОПК.

6.2. С целью выполнения этой задачи разработано приспособление из двух последовательно соединенных ОПК для определения в них потерь на трение.

#### 7. Новый метод определения адгезионной компоненты трения

7.1. В методе Михина при измерении адгезионной компоненты при верчении гладкого шара в поллой сфере.

1) полагают, что из-за гладких поверхностей максимально уменьшается деформационная компоненты:

$$(F_{\text{д}})_{\text{мх}}^{\text{ск}} \approx 0; \quad (7, а)$$

2) при этом полагают, что замеренная сила  $F$  трения полностью совпадает с адгезионной компонентой:

$$(F)_{mix}^{ck} \approx F_A; \quad (7, в)$$

3) в этом случае для определения деформационной компоненты  $F_d$  необходимо испытывать пару трения в реальных условиях при наличии как адгезионной, так и деформационной компонент:

$$(F)_{mix} = F_A + F_d, \quad (7, с)$$

тогда

$$F_d = (F)_{mix} - F_A. \quad (7, d)$$

7.2. В новом, предлагаемом здесь методе, определения адгезионной и деформационной компонент выполняется в три этапа:

1) Этап 1. Качение жесткого шарика по пластически деформируемой плоскости:

2) при этом полагаем, что основная сила возникает из-за пластической деформации плоскости:

$$F^{кач} = F_d^{кач}, \quad (7, е)$$

это основное допущение метода.

3) Этап 2. Скольжение жесткого шарика по смазанной пластически деформационной поверхности при этом полная сила трения:

$$F^{ck} = F_d^{ck} + F_A^{ck}. \quad (7, f)$$

4) Этап 3. Из (7, f) определяется адгезионная компонента силы трения равна:

$$F_A = F^{ck} - (F_d - F_d^{кач}). \quad (7, g)$$

7.3. Вопрос о сравнительной оценке точности определения адгезионной составляющей по методу Михина и предложенному методу для решения требует дополнительных исследований.

## 8. Два слова о законах и критериях научного творчества

8.1. Истинность всякого творчества: художественного, научного или просто создания чего-то нового определяется радостью от процесса и его результата.

8.2. Критерием истинности научных результатов для меня прежде всего является радость, полученная автором при их получении.

8.3. Каждый из полученных в этой работе новых результатов был всплеском радости при их получении, а это как я думаю основной критерий истинности полученных результатов.

8.4. Если согласится с тем, что человек создан для счастья, то есть для радости, то самый истинный путь получения этой радости это новые результаты в творчестве и прежде всего в научном творчестве.

8.5. Иными словами новые мысли, идеи и их реализация это одновременно и продукт (результат работы) ума и источник энергии необходимой для работы ума, и для получения новых идей и новый радости.

Еще короче новые идеи и мысли это и цель, это и основное средство достижения цели. Это вечный двигатель человека.

8.6. Хочу стереть скептические улыбки с лиц тех читателей, которым сказанное возможно не совсем понятно или совсем не понято, и пожелать им все же радостей, в том числе и от научного творчества.

## Литература

1. Кузьменко А.Г. Прикладная теория твердости поверхностей // Проблемы трибологии. – 2006. – № 2. – С. 3-62.
2. Кузьменко А.Г. Твердость и трение: определение механических свойств поверхности по внедрению к сдвигу шара // Проблемы трибологии. – 2008. – № 3. – С. 15-43.
3. Кузьменко А.Г. Исследование метода идентифицирования поверхности шаром с определением новых механических характеристик металлов // Проблемы трибологии. – 2011. – № 1. – С. 100-113.
4. Михин Н.М. Внешнее трение твердых тел. – М.: Наука, 1977. – 221 с.
5. Кузьменко А.Г. Пластический контакт тел двоякой кривизны. – Композиции 1) метода подobia (МП), 2) метода приведенного радиуса (МПР), 3) метода экспериментального теоретического равновесия (МЭТР) // Проблемы трибологии. – 2009. – № 1. – С. 46-64.
6. Дерягин Б.В. Что такое трение. – М.: АН СССР, 1963. – 232 с.
7. Марковец М.П. Определение механических свойств металла по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
8. Заранин Ю.Л. и др. Стали и сплавы в металлургическом машиностроении. – М.: Металлургия, 1980. – 144 с.
9. Михин Н.М. Внешнее трение твердых тел. – М.: Наука, 1977. – 221 с.

Надійшла 27.01.2012