

Кузьменко А.Г.Хмельницький національний
університет,
м. Хмельницький, Україна
E-mail: kuzmenko-36@mail.ru**МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ
ГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ
СМАЗОК НА ИЗНОС**

УДК 621.891

В работе рассмотрены методы и результаты испытаний граничного слоя пластических смазок на износ

Ключевые слова: граничный слой, пластичные смазки, износ, методы расчета

1. Состояние проблемы и постановка задач.*1.1 Общие понятия, допущения, и общая задача.*

- 1) смазывание основной способ, снижения износа рабочих твердых поверхностей узлов трения.
- 2) при этом время работы в зависимости от пути трения S толщина $h(s)$ граничного слоя изменяется $h(s)$, уменьшаясь от начального значения $h(s=0)$ до нуля $h(s=s_*)=0$;
- 3) измерения толщины граничного слоя в процессе испытаний $h(s)$ трудоемкий процесс, контроль, которого в процессе испытаний выполнять нереально.
- 4) в связи с этим возникает необходимость в способе косвенной оценки $h(s)$, например через силу трения $F(s)$; очевидно в соответствии с общей теорией смазки по Ньютону, чем меньше толщина слоя $h(s)$ тем больше сила трения $F(s)$;
- 5) обозначим износ смазки $\Delta h(s)$ так, что:

$$h_w s = \Delta h(s) = h(s) - h_0 \quad (1.1)$$

При этом полагаем, что в первом приближении зависимость износа смазки от пути трения линейная

$$h_w(s) = kF(s) \quad (1.2)$$

$$\text{где } F(s) = cs^b \text{ очевидно } \beta < 1; \quad (1.3)$$

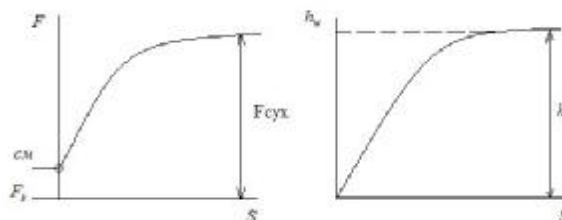


Рис. 1.1— Зависимости силы трения и толщины смазки от пути трения.

- 6) в результате может быть исследована модель износа слоя в форме

$$F(s) = h_w(\sigma, s) = k_w \sigma^m s^n; \quad (1.4)$$

- 7) в первом приближении можно положить $n = 1$. Зависимость износа от пути трения, указывает на неустановившийся характер процесса изнашивания при $n \neq 1$;

- 8) главная задача состоит в определении параметров k_w, n, m по результатам испытаний с целью количественного сравнения износа разных смазок с учетом давления S и пути трения s .

1.2 О первой работе [1] автора по износу смазки.

1) В работе [2] впервые было предложено использовать схему: верчение шара в сферической полости, разделенных слоем граничной смазки использовать как метод испытаний смазки на износ в реверсивном режиме.

2) использовался шар $d = 30 \text{ мм}$, верчение ригелем $l = 320 \text{ мм}$ привод оси кривошипа и двигатель постоянного тона; нагрузки оси прессы Бринелля в диапазоне $187,5 \text{ кг} - 2000 \text{ кг}$.

3) в соответствии с законом Ньютона для течения жидкости между твердыми поверхностями полагали, что толщина масляной пленки обратно пропорциональна напряжений (и силе) трения.

В результате испытаний было установлено:

4) принципиальная возможность учитывать измерения толщины граничной смазки через измерения силы трения.

5) целесообразность использования в качестве меры измерения толщины пленки относительную величину – отношения сил трения.

6) оставался нерешенным при испытаниях вопрос учета разных факторов: давления, путь трения, скорость скольжения и т.д., т.н.

В работе [1] не было предельна модель изнашивания пленки.

1.3 Рейтинговые испытания а износ пластических смазок [2];

Развитие метода испытаний

1) в части схемы и оборудования методика испытания соответствует методике [1].

2) в теоретической части в [2] ставится задача сравнения разных видов смазок при использовании простейшей двух факторной (σ_2, s), двух параметрической (k_w, m) модели установившегося изнашивания.

$$h_w = k_w \sigma^m s \quad (1.5)$$

3) получена зависимость для определения параметров k_w, m по результатам испытаний;

4) Проведены испытания 12 видов пластических смазок:

5) сравнение смазок выполнено по приближенному критерию-числу циклов или пути трения S , при которых в одинаковых силовых и кинематических условиях сила трения становится равной силе трения без смазки

$$h_i(s, F_{cm}(s)) = n(s=0, F_{cух}) \quad (1.6)$$

был сделан вывод высокой эффективности предложенного экспресс-метода испытаний граничного слоя пластических смазок на износ в заданных одинаковых для всех смазок условия, получен рейтинг износостойкости пластических смазок;

6) в частности установлено, что пластическая смазка Мобил в 30 раз дольше работает до предельного состояния в сравнении с солидолом.

1.4 Замечания и перспективы :

1) для повешения точности метода испытаний необходимо совершенствование модели изнашивания с учетом трех основных факторов σ, s, v ; v - скорость;

2) так, чтобы стало возможным прогнозировать износ смазки в реальных условиях с учетом: давления σ пути трения S , скорость скольжения v , кинематики сопряжения: непрерывного, реверсивного движения;

На решения еще не решенных указанных задач направлена данная работа.

1.5 Систематизация задач испытания смазок на износ.

I. Задачи испытаний и определения параметров моделей можно разделить по следующим направлениям.

1. по схеме испытаний.

- 1) вращения шара в сферической полости;
- 2) вращения шара в сферической полости;
- 3) скольжения шара на полости;
- 4) вращения цилиндра в цилиндрической полости;
- 5) четырехшариковая схема;

2. по виду движения образца;

- 1) непрерывное в одном направлении;
- 2) реверсивное;
- 3) для цилиндра: левое, вращательное.

3. по моделям и факторам учитываемых в модели;

1) σ – давления; S - путь трения; v - скорость скольжения; T - температура.

2) двухфакторная σ, s , двухпараметрическая k_w, m модель первого уровня.

$$h_w = k_w \sigma^m s \quad (1.4)$$

3) двухфакторная трехпараметрическая

$$h_w = k_w \sigma^m s^n \quad (1.5)$$

4) трехфакторная четырехпараметрическая

$$h_w = k_w \sigma^m v^n s^l; \quad (1.6)$$

5) трехфакторная трехпараметрическая (учет скорости)

$$h_w = k_w \sigma^m v^n s; \quad (1.7)$$

6) трехфакторная трехпараметрическая (учет температуры T)

$$h_w = k_w \sigma^m T^n S \quad (1.8)$$

4. По видам смазок 1) пластинные 2) масла

5. Задачи расчетов узлов трения с определением степени изношенности смазки или приработки. Узлы трения.

- 1) подшипники скольжения;
 - 2) подшипники качения;
 - 3) направляющие (плоские, цилиндрические)
6. Применяющие модели $n=1$, $n=3$

Цели расчетов и испытаний.

- 1) определение времени до замены смазки.
- 2) разработка времени мероприятий по повышению износостойкости узлов трения путем разработки методов восстановления смазки в узле;
- 3) итоги предварительных исследований указанных на: необходимость разработки методов восстановления пластинки смазок, как на главный вопрос повешения износостойкости узлов трения с пластическими смазками:
- 4) эти методы с периодическим смазыванием.
- 5) методы с автоматическими смазыванием.

2. Теория определения параметров модели изнашивания смазок.

2.1 Модель и задача эксперимента

- 1) принимаем двух факторную трехпараметр

$$\bar{F} = h_w = k_w \sigma^m s^\beta \quad (2.1)$$

$$\text{где } h_w = \frac{h_0 - h_w}{h_w} = k\bar{F}, \bar{F} = \frac{F}{F_0}; \quad (2.2)$$

- 2) схема испытания: вращения шара в сферической полости т.е при заданной нагрузке Q давления величина постоянная определяемая по зависимости:

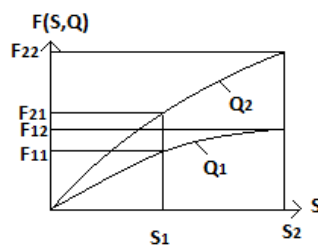
$$\sigma = \frac{Q}{\pi a^2} \quad (2.3)$$

где a – радиус трения площади контакта
направление вращения постоянное в одну сторону;

- 3) задача эксперимента состоит в определении параметров k_w, m, n модели (2.1) по результатам испытаний

2.2 План эксперимента

- 1) Для определения трех параметров k_w, m, n необходимо иметь три базовые точки.
- 2) выбираем схему испытания по рис 1.



Испытания смазки на износ с определением сил трения выполнены при двух нагрузке Q_1 и Q_2 .

- 3) при каждой нагрузке снимаем зависимость сил трения от пути трения $F(S)$.

2.3 Вывод соотношения для определения параметров k_w, m, s .

1. Определения параметров β

- 1) Запишем (2.1) для точек $(F_{11}, S_1), (F_{12}, S_2)$

$$F_{11} = k_w \sigma_1^m s_1^{\beta_1}; F_{12} = k_w \sigma_1^m s_2^{\beta_1} \quad (2.4)$$

- 2) взяв отношения в (2.4) имеем:

$$\frac{F_{11}}{F_{12}} = \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{\beta_1} \quad (2.5)$$

отсюда:

$$\beta_1 = \frac{\lg F_{11}/F_{12}}{\lg S_1/S_2} \quad (2.6)$$

3) аналогичным образом для точек: $(F_{21}, S_1), (F_{22}, S_2)$ имеем:

$$\beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg S_1/S_2} \quad (2.7)$$

4) параметры β_1, β_2 разные, зависящие от нагрузки; в первом приближении можно взять: среднее значение

$$\beta_\phi = (\beta_1 + \beta_2) / 2 \quad (2.8)$$

2. Определение параметров k_w, m .

1) возьмем две базовые точки

$(F_{12}, S_2), (F_{22}, S_2)$ далее по модели

$$F(S, Q) = k_w \sigma^m s^\beta \quad (2.9)$$

имеем уравнение

$$F_{12} = k_w \sigma_1^m S_2^\beta; F_{22} = k_w \sigma_2^m S_2^\beta \quad (2.10)$$

2) решая (2.10) имеем

$$m = \frac{\lg F_{12}/F_{22}}{\lg (\sigma_1/\sigma_2)} \quad (2.11)$$

3) параметр k_w из первого уравнения (2.10) имеем

$$k_w = \frac{F_{12}}{\sigma_1^m S_2^\beta} \quad (2.12)$$

2.4 Сравнение износа разных смазок.

1) запишем модель (2.1) для двух разных смазок:

$$\bar{F}_1 = k_{w1} \sigma^{m1} s^{(\beta)_1}; \bar{F}_2 = k_{w2} \sigma^{m2} s^{(\beta)_2} \quad (2.13)$$

2) взяв соотношение (2.13) имеем при одинаковых σ

$$\frac{\bar{F}_1}{\bar{F}_2} = \frac{k_{w1}}{k_{w2}} (\sigma)^{m_1 - m_2} (s)^{\beta_1 - \beta_2} \quad (2.14)$$

3) если в первом приближении принять $\beta_1 - \beta_2 = 1$ то из (2.14) имеем:

$$\frac{\bar{F}_1}{\bar{F}_2} = \frac{k_{w1}}{k_{w2}} (\sigma)^{m_1 - m_2} \quad (2.15)$$

3. Рейтинговое оценивание износостойкости пластических смазок

3.1 Теоретическое соотношение и методика

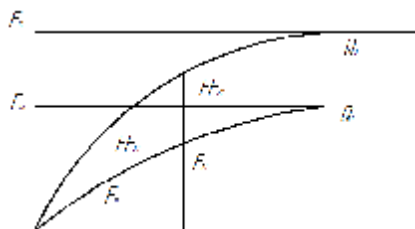


Рис. 3.1—Схема опыта

3.1.1 Термины

- 1) F_{01} - сила трения без смазки при нагрузке Q_1 ;
- 2) F_{02} - сила трения без смазки при нагрузке Q_2 ;
- 3) F_{11} - сила трения при нагрузке Q_1 со смазкой после работы в течение t_1 минут $F_{11}(Q_1, t_1)$;
- 4) F_{12} - тоже после t_2 минут $(F_{12}(Q_1, t_2))$;

- 5) $F_{21}(Q_2, t_1)$ - сила трения при нагрузке Q_2 после работы в течение t_1 минут;
- 6) $F_{22}(Q_2, t_2)$ - тоже после работы в течение t_2 минут;
- 7) t_1^* - продолжительность работы в минутах при нагрузке Q_1 со смазкой, при которой сила трения сравняется с нагальной силой трения без смазки;
- 8) t_2^* - тоже при нагрузке Q_2 ;
- 9) $t_1^* t_2^*$ - износостойкость пластической смазки на установке УМ-25-ПОРТ в минутах;

3.1.2 Модель и функции изменения силы трения в установке;

- 1)
$$F = k_F Q^m t; \quad (3.1)$$

- 2) k_F - коэффициент износостойкости изменения силы трения в установке;

3.1.3 Степенная аппроксимация функции;

- 1)
$$F(Q, t) = ct^\beta; \quad (3.2)$$

c, β - параметры аппроксимации;

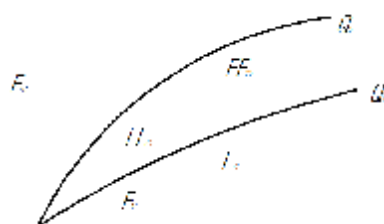


Рис.3.2—Схема выбора базовых точек

- 3) Функция $F_1(Q, t) = c, t^\beta$ выбор базовых точек :

$$(F_{11}, t_1) (F_{12}, t_2); \quad (3.4)$$

- 4) (3.4) \rightarrow (3.3) $\Rightarrow F_{11} = c_1 t_1^{\beta_1}; F_{12} = c_1 t_2^{\beta_1}; \quad (3.5)$

- 5) (3.5) $\Rightarrow \frac{F_{11}}{F_{12}} = \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^{\beta_1}; \quad (3.6)$

- 6) (3.6) $\Rightarrow \beta_1 = \frac{\lg F_{11}/F_{12}}{\lg t_1/t_2}; \quad (3.7)$

- 7) (3.5) $\Rightarrow C_1 = \frac{F_{11}}{t_1^{\beta_1}}; \quad (3.8)$

- 8) Аналогично: $\beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg t_1/t_2}; C_2 = \frac{F_{21}}{t_2^{\beta_2}}; \quad (3.9)$

3.1.4 Определение износостойкости смазки t^* из условия:

$$F(t^*, Q_i) = F_{oi}; \quad (3.4)$$

- 2) Для $Q = Q_2$: $F(t_2^*, Q_2) = F_{o2}; \quad (3.5)$

- 3) С учетом (3.2) из (3.5) уравнения для t_2^* : $C_2 (t_2^*)^{\beta_2} = F_{o2}; \quad (3.6)$

- 4) Решения (3.6) относительно t_2^* , имеем: $t_2^* = \left(\frac{F_{o2}}{C_2} \right)^{\frac{1}{\beta_2}}; \quad (3.7)$

3.1.5 Сравнение износостойкости пластических смазок возможно 1) качественно (рейтинговые по величине t_2^*) и 2) количественное по интенсивности изнашивания, вторая методика сравнения требует дополнительных исследований как определение параметров так и определений условий работы конкретного узла трения.

3) Далее в п.3.2 показать процедуру и некоторые рейтинговые сравнения некоторых смазок.

3.1.6 Условия испытаний для всех смазок одинаковые.

- 1) Верчение шара со скоростью 150 об / мин .

- 2) Нагрузка на шар $Q_1 = 2,2 \text{ кг}$, $Q_2 = 4,5 \text{ кг}$.
- 3) Измерение силы трения диаметром на плече $e...$ после испытаний в течение времени t .
- 4) Средний путь трения 3 и 5 минут $S_{cp} = \pi d n t = \pi \cdot 1S \cdot 150 \cdot 5 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}$.
- 5) Перед началом испытаний смазка удаляется, поверхность обезжиривается.
- 6) Измеряется сила трения после работе без смазки в течение 3-5 мин.
- 7) Наносится тонкий слой испытываемой смазки размазать.
- 8) Измеряется сила трения со смазкой в начале испытаний.
- 9) Проводятся испытания, и сила трения измеряется через каждые 5 минут работы.
- 10) Результаты испытаний заносятся в таблицу вида.

Q ₁			Q ₂		
t	S, мм · 10 ⁴	F	t	S, мм · 10 ⁴	F
сух			сух		
5	3.5		5	3.5	
10	7.0		10	7.0	
15	10.5		15	10.5	

- 11) По результатам испытаний строим графики зависимости. $F_1(Q, S); F_2(Q, S);$

3.2.1 Опыты: Литол-24, рейтинг.

- 1) Результаты

Q ₁ =2.2кг			Q ₂ =4.5кг		
t мин	S, мм · 10 ⁴	F кг	t	S, мм · 10 ⁴	F
сух		0.46	сух		1.05
5	3.5	0.19	5	3.5	0.35
10	7.0	0.23	10	7.0	0.42
15	10.5	0.28	15	10.5	0.48

- 2) Базовые точки при нагрузке $Q_2 = 4,5 \text{ кг}$, $F_{21}(t_1 = 5 \text{ мм}) = 0,35 \text{ кг}$; $F_{22}(t = 15 \text{ мм}) = 0,48 \text{ кг}$.

- 3) Параметры β_2, C_2 сменной аппроксимации функции: $F_2(Q_2, t) = C_2 t^{\beta_2}$,

Определяются по(3.9)с учетом базовых точек:

$$\beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg t_1/t_2} = \frac{\lg 0,35/0,48}{\lg 5/15} = \frac{0,137}{0,477} = 0,287, C_2 = \frac{F_{21}}{t_1^{\beta_2}} = \frac{0,48}{(15)^{0,287}} = \frac{0,48}{2,1760} = 0,22;$$

3.2.1 Определение величины t_2^* по (3.7).

$$t_2^* = \left(\frac{F_{02}}{C_2} \right)^{\frac{1}{\beta_2}} = \left(\frac{1,05}{0,22} \right)^{\frac{1}{0,287}} = (4,773)^{3,484} = 185 \text{ мм}, (t_2^*)^I = 185 \text{ мм}.$$

литол-24.

3.2.3 Опыт 21, смазка графитная, рейтинг.

- 1) Результаты и базовые точки,

Q ₁ =2.2кг			Q ₂ =4.5кг		
t мин	S, мм · 10 ⁴	F	t	S, мм · 10 ⁴	F
5	3.5	0.18	5	3.5	0.47
10	7.0	0.24	10	7.0	0.67
15	10.5	0.33	15	10.5	0.85

- 2) Параметры β_2, C_2 аппроксимации функции:

$$\beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg t_1/t_2} = \frac{\lg 0,47/0,85}{\lg 5/15} = \frac{0,2573}{0,477} = 0,5395, C_2 = \frac{F_{21}}{t_1^{\beta_2}} = \frac{0,47}{5^{0,5325}} = \frac{0,47}{2,356} = 0,199 \approx 0,2.$$

- 3) Нароботка до паяного износа $(t_2^*)^{II}$ по формуле (3.7).

$$t_2^* = \left(\frac{F_{02}}{C_2} \right)^{\frac{1}{\beta_2}} = \left(\frac{1,05}{0,2} \right)^{\frac{1}{0,5395}} = (5,25)^{1,854} = 21,64, (t_2^*)^{II} = 21,64 \text{ мин}.$$

Графитная.

Опыт 3А. Смазка Мобил, рейтинг.

Q ₁ =2.2кг			Q ₂ =4.5кг		
t	S, мм · 10 ⁴	F	t	S, мм · 10 ⁴	F
5	3.5	0.25	5	3.5	0.32
10	7.0	0.19	10	7.0	0.4
15	10.5	0.13	15	10.5	0.62

2) Параметры β_2, C_2 :

$$\beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg t_1/t_2} = \frac{\lg (0,32/0,62)}{\lg 5/15} = \frac{0,287}{0,477} = 0,602, C_2 = \frac{F_{21}}{t_2^{\beta_2}} = \frac{0,32}{5^{0,602}} = \frac{0,32}{2,635} = 0,122,$$

3) Нароботка (t_2^*) до полного износа смазки мобил в заданных условиях по (3.7).

$$(t_2^*)^{II} = \left(\frac{F_{02}}{C_2} \right)^{\frac{1}{\beta_2}} = \left(\frac{1,05}{0,122} \right)^{\frac{1}{0,602}} = (8,606)^{1,66} = 35,63, (t_2^*)^{III} = 35,63 \text{ мин};$$

Мобил.

Опыт 4А. Смазка Castrol, рейтинг.

Q ₁ =2.2кг			Q ₂ =4.5кг		
t	S, мм · 10 ⁴	F	t	S, мм · 10 ⁴	F
5	3.5	0.21	5	3.5	0.34
10	7.0	0.26	10	7.0	0.39
15	10.5	0.32	15	10.5	0.45

2) Параметры β_2, C_2 :

$$\beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg t_1/t_2} = \frac{\lg 0,34/0,45}{\lg 5/15} = \frac{0,1217}{0,477} = 0,255, C_2 = \frac{F_{21}}{t_2^{\beta_2}} = \frac{0,34}{5^{0,255}} = \frac{0,34}{1,587} = 0,214;$$

3) наработка (t_2^*): $(t_2^*) = \left(\frac{F_{02}}{C_2} \right)^{\frac{1}{\beta_2}} = \left(\frac{1,05}{0,214} \right)^{\frac{1}{0,255}} = (4,906)^{3,92} = 496, t_2^* = 496;$ **Сводная таблица наработки на предельный износ**

номер	смазка	t_2^* минуты	t_2^* часы
1	Литол-24	185	3.08
2	графитная	21.64	0.36
3	мобил	35.63	0.59
4	Castrol	496	8.27

Вывод по разделу 3:

1. Предложен метод, ранжировано пластических смазок по продолжительности работ до полного износа.

2. Из трех испытанных смазок наибольший ресурс у смазки Castrol.

Соответственно ресурс: Castrol -8.27, Литол-24 -3.08, Мобил-0.59, Графитная-0.36,

Т.е. Castrol в три раза более износостойкий, чем Литол-24.

4. Использование модели изнашивания смазки, для оценки ее сравнительной износостойкости.

4.1 Мера измерения толщины смазки и модель.

1) Брать в качестве меры износа смазки изменение ее толщину Δh затруднительно чисто по техническим причинам;2) В связи с этим в качестве меры изменения толщины при испытаниях будем брать изменение сил трения ΔF и связанную с этим величину безразмерного износа толщину масляной пленки \bar{h}_w

$$\bar{h}_w = \frac{\Delta h}{h_0} = k\Delta F; \quad (4.1)$$

3) Величина \bar{h}_w меняется в пределах: $0 < \bar{h}_w < 1$, $\bar{h}_w(S=0) = 0$; $\bar{h}_w(S=S^*) = 1$;

в дальнейшем черточку для краткости будем опускать.

4) По результатам испытаний смазки на износ определяются параметры модели изнашивания в дифференциальной форме.

$$\frac{du_w}{ds} = k w_h \sigma^m; \quad (4.2)$$

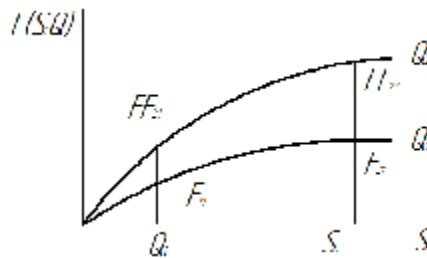
или при давлении, не зависящем от кута S :

$$h_w = k_w \sigma^m S^p, \quad (4.3)$$

где $\sigma = \frac{Q}{\pi a^2}$;

4.2 Схема испытаний для определения параметров k_w, m модели изнашивания смазки.

1) Схема испытаний $\bar{h}_w = kF$:



2) В трехпараметрической k_w, m, β модели:

$$\bar{h}_w = F(S, \sigma) = k_w \sigma^m S^\beta; \quad (4.4)$$

в схеме испытаний необходимо минимум три состояния для составления трех уравнений.

3) Испытания проводятся при двух нагрузках Q_1, Q_2 .

4.3 Вывод основных соотношений для определенных параметров k_w, m, β .

4.3.1 Параметры β_1 и β_2 , запишем (4.4) для нагрузок Q_1 и Q_2 :

$$F_1 = k_{w1} \sigma_1^{m_1} S_1^{\beta_1}, \quad (4.5)$$

$$F_2 = k_{w2} \sigma_2^{m_2} S_2^{\beta_2}; \quad (4.6)$$

1) Для определения параметров β_1, β_2 на каждой функции F_1 и F_2 выбираем по две базовые точки.

$$\left. \begin{array}{l} S_1, F_{11}; S_2, F_{12} \\ S_1, F_{21}, S_2, F_{22} \end{array} \right\} \quad (4.7)$$

2) (4.7) \rightarrow (4.5), (4.6) \Rightarrow ;

$$F_{11} = k_{w1} \sigma_1^{m_1} S_1^{\beta_1}; F_{12} = k_{w1} \sigma_1^{m_1} S_2^{\beta_1}, \quad (4.8)$$

$$F_{21} = k_{w2} \sigma_2^{m_2} S_1^{\beta_2}; F_{22} = k_{w2} \sigma_2^{m_2} S_2^{\beta_2}; \quad (4.9)$$

3) Взяв отношение уравнений (4.8), имеем:
$$\beta_1 = \frac{\log F_{11}/F_{22}}{\lg S_1 S_2}; \quad (4.10)$$

аналогично из уравнений (4.9) имеем:

$$\beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg S_1 S_2}; \quad (4.11)$$

4) Если параметры $\beta_1 \neq \beta_2$ не равны друг другу, определяем среднее значение:

$$\beta = \beta_{cp} = \frac{1}{2}(\beta_1 + \beta_2); \quad (4.12)$$

4.3.2 Допущение: будем в дальнейшем полагать что коэффициент k_{w1}, k_{w2} антексивности износа смазки при давлении σ_1 , и σ_2 одинаковы $k_{w1} = k_{w2} = k_w$ и параметра $m_1 = m_2 = m$

1) С учетом (4.12) и допущения уравнений (4.5), (4.6) принимают вид :

$$F_1 = k_w \sigma_1^m S^\beta; F_2 = k_w \sigma_2^m S^\beta; \quad (4.13)$$

2) Записав (4.13) для точек $F_{12}(\sigma_1, S_2); F_{22}(\sigma_2, S_2)$ имеем:

$$F_{12} = k_w \sigma_1^m S_2^\beta; F_{22} = k_w \sigma_2^m S_2^\beta; \quad (4.14)$$

3) Из отношения уравнений имеем:

$$m = \frac{\lg F_{12}/F_{22}}{\lg \sigma_1/\sigma_2}; \quad (4.15)$$

4.4 Определение параметров k_w .

Из любого уравнения (4.14) можно найти параметр k_w ; например из первого (4.14) уравнения при известных m и β .

$$k_w = \frac{F_{12}}{\sigma_1^m S_2^\beta}; \quad (4.16)$$

4.4.1 Сравнение износа разных смазок в одинаковых и разных условиях.

1) Пусть для двух смазок I и II известных параметров:

$$k_w^I, m^I, \beta^I; k_w^{II}, m^{II}, \beta^{II};$$

2) Запишем уравнения моделей (4.4) для этих смазок:

$$h_w^I = k_w^I \sigma^{m^I} S^{\beta^I}; k_w^{II} = k_w^{II} \sigma^{m^{II}} S^{\beta^{II}}; \quad (4.17)$$

3) Взяв отношение уравнений (4.17), получаем отношение износа смазок при одинаковых давлениях.

$$\sum_{I, II} \frac{h_w^I}{h_w^{II}} = \frac{k_w^I}{k_w^{II}} \sigma^{m^I - m^{II}}; \quad (4.18)$$

4.5 Определение износа смазки в разных узлах трения.

1) В разных узлах трения условия работы давления σ и путь трения могут быть разными.

2) Если из эксперимента найдены все k_w, m, β параметры модели трения для заданной смазки, то определение величин h_w относительного износа смазки определяется в зависимости (модели) (4.4).

$$\bar{h}_w = k_w \sigma^m S^\beta; \quad (4.19)$$

3) Для выполнения расчетов необходимо найти: 1) давление σ в контакте из решения соответствующей контактной задачи, 2) путь трения в контакте на заданном времени работы.

Примера определения параметров модели и определения относительного износа смазки приведена далее в пункте 5.

5. Определение параметров трехфакторной модели и расчет износа ГС узлов трения.

5.1 Общая схема, методика и основные соотношения метода.

1) Модель изнашивания ГС по (4.3).

$$h_w = k_w \sigma^m S^\beta; \quad (5.1)$$

$$\beta_1 = \frac{\lg F_{11}/F_{12}}{\lg S_1/S_2}; \beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg S_1/S_2}; \quad (5.2)$$

$$\beta = \frac{1}{2}(\beta_1 + \beta_2); \quad (5.3)$$

$$m = \frac{\lg F_{12}/F_{22}}{\lg \sigma_1/\sigma_2}; \quad (5.4)$$

$$k_w = \frac{F_{12}}{\sigma_1^m S_2^\beta}, \sigma_1 = \frac{Q}{\pi d^2}; \quad (5.5)$$

$$\varepsilon^{I/II} = \frac{h^I}{h^{II}} = \frac{k_w^I}{k_w^{II}} \sigma^{m^I - m^{II}}; \quad (5.6)$$

5.2 Опыты.

Условия и методика испытаний описаны в пункте 3.1

Опыт 1В, Литол-24, параметры.

1) Результаты испытаний приведены в таблице 3.1, базовые точки функции $F_1(S), F_2(S)$:

$$F_{11} = 0,19 \text{ кГ}; S_1 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; F_0 = 1,05 \text{ кГ}; F_{12} = 0,28 \text{ кГ}; S_2 = 10,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; Q_1 = 2,2 \text{ кГ};$$

$$F_{21} = 0,35 \text{ кГ}; S_1 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; Q_2 = 4,5 \text{ кГ}; F_{22} = 0,48 \text{ кГ}; S_2 = 10,5 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

2) По (5.2):

$$\beta_1 = \frac{\lg F_{11}/F_{12}}{\lg S_1/S_2} = \frac{\lg 0,19/0,28}{\lg 3,5/10,5} = \frac{0,1684}{0,477} = 0,353; \beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg S_1/S_2} = \frac{\lg 0,35/0,48}{\lg 3,5/10,5} = \frac{0,137}{0,477} = 0,287$$

$$\beta = \frac{1}{2}(\beta_1 + \beta_2) = \frac{1}{2}(0,353 + 0,287) = 0,32$$

3) По (5.4):

$$m = \frac{\lg F_{12}/F_{22}}{\lg Q_1/Q_2} = \frac{\lg 2,8/0,48}{\lg 2,2/4,5} = \frac{0,234}{0,31} = 0,755;$$

4) По (5.5):

$$k_w = \frac{F_{12}}{\sigma_1^m S_2^\beta} = \frac{0,28}{77 \cdot (10,5 \cdot 10^4)^{0,32}} = \frac{0,28}{0,058 \cdot (10,5 \cdot 10^4)^{0,32}};$$

$$\sigma = \frac{4,5}{(\pi \cdot 10^2)^{0,755}} = \frac{4,5}{(\pi \cdot 100)^{0,755}} = \frac{4,5}{77} = 0,058;$$

$$a = 10; d = 2a$$

$$k_w = \frac{0,28}{0,058 \cdot (10,5 \cdot 10^4)^{0,32}} = \frac{0,28}{0,058 \cdot 40} = 0,12; \quad k_w = 0,12.$$

5.3 Опыт 2В. Графитная смазка.

1) Базовые точки функции $F_1(S), F_2(S)$:

$$F_{11} = 0,18 \text{ кГ}; S_1 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; F_{12} = 0,33 \text{ кГ}; S_2 = 10,5 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

$$F_{21} = 0,47 \text{ кГ}; S_1 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; F_{22} = 0,85 \text{ кГ}; S_2 = 10,5 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

2) По (5.2):

$$\beta_1 = \frac{\lg F_{11}/F_{12}}{\lg S_1/S_2} = \frac{\lg 0,18/0,33}{\lg 3,5/10,5} = \frac{0,263}{0,477} = 0,551; \beta_2 = \frac{\lg F_{21}/F_{22}}{\lg S_1/S_2} = \frac{\lg 0,47/0,85}{0,477} = \frac{0,137}{0,477} = 0,5338$$

$$\beta = \beta_{cp} \frac{1}{2}(0,5551 + 0,5338) = 0,544; \beta = 0,544$$

3) По (5.4):

$$m = \frac{\lg F_{12}/F_{22}}{\lg Q_1/Q_2} = \frac{\lg 3,3/0,85}{\lg 2,2/4,5} = 1,325; m = 1,325;$$

4) По (5.5):

$$k_w = \frac{F_{12}}{\sigma_1^m S_2^\beta} = \frac{0,33}{0,058^{1,325} (10,5 \cdot 10^4)^{0,544}} = 2,662; k_w = 2,662;$$

5.4 Опыт 3В. Смазка Мобил.

1) Базовые точки:

$$F_{11} = 0,25 \text{ кГ}; S_1 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; F_0 = 1,05; F_{12} = 0,3 \text{ кГ}; S_2 = 10,5 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

$$F_{21} = 0,32 \text{ кГ}; S_1 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; F_{22} = 0,62 \text{ кГ}; S_2 = 10,5 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

2) По (5.3):

$$\beta_1 = \frac{\lg F_{11}/F_{12}}{\lg S_1/S_2} = \frac{\lg 0,25/0,3}{0,477} = \frac{0,079}{0,477} = 0,166; \beta_2 = \frac{\lg 0,32/0,62}{0,477} = \frac{0,2872}{0,477} = 0,602$$

$$\beta = \frac{1}{2}(0,166 + 0,602) = 0,38$$

3) По (5.4):

$$m = \frac{\lg F_{12}/F_{22}}{\lg Q_1/Q_2} = \frac{\lg 0,3/0,62}{\lg 2,2/4,5} = \frac{0,315}{0,31} = 1,02; m = 1,02;$$

$$4) \text{ По (5.5): } k_w = \frac{F_{12}}{\sigma_1^m S_2^\beta} = \frac{0,33}{(0,058)^{1,02} (10,5 \cdot 10^4)^{0,384}}; k_w = \frac{0,33}{0,055 \cdot 85} = 0,705; k_w = 0,705;$$

5.5 Опыт 4В. Смазка Castrol.

1) Базовые точки:

$$F_{11} = 0,06 \text{ кЗ}; S_1 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; F_{12} = 0,09 \text{ кЗ}; S_2 = 10,5 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

$$F_{21} = 0,13 \text{ кЗ}; S_1 = 3,5 \cdot 10^4 \text{ мм}; F_{22} = 0,18 \text{ кЗ}; S_2 = 10,5 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

$$2) \beta_1 = \frac{\lg 0,06/0,09}{\lg 3,5/10,5} = \frac{0,25}{0,477} = 0,524;$$

$$3) \beta_2 = \frac{\lg 0,13/0,18}{0,477} = \frac{0,141}{0,477} = 0,296;$$

$$4) \beta = \frac{1}{2} (0,524 + 0,296) = 0,41; \beta = 0,41;$$

$$5) m = \frac{\lg 0,09/0,18}{\lg 2,2/4,5} = \frac{0,301}{0,31} = 0,97 \approx 1;$$

$$6) k_w = \frac{F_{12}}{\sigma_1^m S_2^\beta} = \frac{0,09}{(0,058)^1 (10,5 \cdot 10^4)^{0,41}}; k_w = \frac{0,09}{0,058 \cdot 114,5} = 0,0135; k_w = 0,0135;$$

Таблица 4

Итоговая таблица результатов испытаний смазок

№ опыта	Смазка	β	m	k_w	$\varepsilon = \frac{h}{h^I}$
1	Литол-24	0,32	0,755	0,12	1
2	графитная	0,544	1,325	2,662	22,0
3	Мобил	0,384	1,02	0,705	5,87
4	Castrol	0,97	0,97	0,0135	0,11

Литература

1. Кузьменко А.Г. Новые методы и результаты исследований (адгизионно-деформационны) теории трения (АДД часть 2) II Проблемы трибологии-2012. -№2 – с 13-32.

2. Кузьменко А.Г. Метод и результаты испытаний на износ пластических смазок в реверсивном режиме.

Надійшла в редакцію 04.12.2014

Kuzmenko A.G. Methods and results of tests of border layer of the plastic greasings

Methods and results of tests of border layer of the plastic greasings are in-process considered on a wear

Key words: border layer, plastic greasings, wear, methods of calculation

References

1. Kuzmenko A.G. Novyye metody i rezultaty issledovaniy (adgizionno-deformatsionny) teo-rii treniya (ADD chast 2) II Problemy tribologii-2012. N2 . p 13-32.

2. Kuzmenko A.G. Metod i rezultaty ispytaniy na iznos plasticheskikh smazok v reversivnom rezhime.