

Кузьменко А.Г.Хмельницкий национальный университет,
г. Хмельницкий, Украина
E-mail: tribosenator@gmail.com**МЕТОД И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ
НА ИЗНОС ПЛАСТИЧЕСКИХ СМАЗОК
В РЕВЕРСИВНОМ РЕЖИМЕ**

УДК 621.891

Предложена модель и метод испытаний смазок на износ с определением параметров моделей изнашивания. Выполнены испытания основных пластических смазок на износ с построением рейтинга их износостойкости. Метод рекомендуется для широкого применения в практике оценки качества пластических смазок.

Ключевые слова: пластические смазки, метод испытаний на износ, расчет смазок по износу.

Введение и постановка задач

Основной метод повышения износостойкости состоит в применении стандартных и специальных смазок.

Процесс работы смазанных поверхностей проходит в два этапа:

1) истирание или изнашивание граничного слоя смазки m первоначального значения толщины h_v и до $h = 0$;

2) второй этап частично перекрывающий первый этап состоит изнашивании твердых контрактующих поверхностей.

Методы испытаний на износ твердых поверхностей детально изложены в монографии [1].

Данная работа посвящена разработке метода испытаний на износ граничной смазки. С построением модели изнашивания смазки и определения параметров модели изнашивания.

Цель построения этих моделей создания обоснование алгоритмов определения периодов подачи новых порций смазки.

Эффективность любой смазки обеспечивается только регулярной её подачей периодами предельного износа

1. Теория эксперимента**1.1. Постановка задачи**

1) расчетная схема, эксперимента (рис. 1);

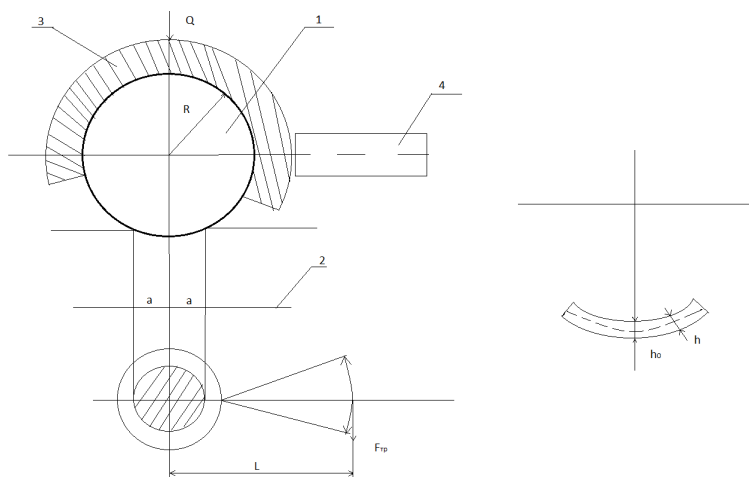


Рис. 1 – Схема взаимодействия сферы и полости

2) рассматривается контакт силой Q шара R и сферической полости R без зазора;

3) между шаром и полостью имеется тонкий (порядка 1 мкм) слой пластической смазки;

4) шар закреплен в обойме 3; к обойме закреплён стержень 4; к стержню прикладывается касательно сила F_{TP} , под действием которой поверхность шара скользит по слою смазки, нанесенной на поверхность полусферы;

5) шар поворачивается многократно циклически; при этом тонкий слой толщиной h граничной смазки уменьшается или изнашивается; в следствии этого момент трения увеличивается с каждым циклом на некоторую величину ΔF_{TP} ;

б) слой с первоначальной толщиной h_0 уменьшается на величину Δh равную износу слоя U_w^c ; Ставится задача по результатам испытаний установить закономерности изнашивания тонкого слоя смазки с целью их дальнейшего использования при назначении периода восстановления смазки в эксплуатации и получении характеристик изнашивания смазки.

1.2. Математическая постановка задачи

1) алгебраическая модель изнашивания слоя смазки применяется в форме:

$$U_w^c = K_w \sigma^m S, \quad (1.1)$$

где
$$U_w^c = h_0 - h = \Delta h, \quad (1.2)$$

U_w – износ слоя смазки;

h_0 – начальная толщина слоя;

h – текущая толщина слоя;

Δh – изнашиваемая толщина слоя;

2) при циклических испытаниях измеряется сила трения F_{TP} на плече L и вычисляется момент трения:

$$M = F_{TP} L; \quad (1.3)$$

3) среднее нормальное давление определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{Q}{\pi a^2}, \quad (1.4)$$

где a – радиус круга проекции площадки контакта;

4) S – путь трения скольжения точек шара по сферической полости; за один цикл:

$$\Delta S = 2L\Delta\phi \quad (1.5)$$

за n циклов:

$$S = 2L\Delta\phi n; \quad (1.6)$$

5) по испытаниям при двух разных нагрузках Q_1 и Q_2 получают данные для двух функций $F_{TP}(Q_1, n); F_{TP}(Q_2, n)$;

6) ставится задача по двум функциям $F_{TP}(Q_1, n); F_{TP}(Q_2, n)$; определения K_w, m модели изнашивания граничной смазки.

1.3. Решение задачи

1.3.1. Выражение толщины слоя через силу трения F_{TP}

1) допущение 1: принимаем, что значение толщины масляной пленки h_0 – известно; для определенности в начале до точки определения величины принимаем $h_0 = 1 \text{ мкм} = 10^{-3} \text{ мм}$;

2) допущение 2: принимаем, что изменение толщины граничного слоя происходит по закону Ньютона, применительно для граничного слоя с малой толщиной $h = 10^{-3} \text{ мм}$ в форме:

$$\tau = \mu \frac{v}{h}, \quad (1.7)$$

где τ – касательное напряжение в контакте;

μ – динамический коэффициент вязкости;

v – скорость скольжения в паре трения;

h – текущая толщина;

3) примем очевидное соотношение:

$$\tau \tau = kF_{TP}, \quad (1.8)$$

где по [2]:

$$K = \frac{3}{2} \frac{M}{\pi a^2} = \frac{3F_{TP}L}{2\pi a^2}; \quad (1.9)$$

4) запишем (1.7) для двух сил трения F_{TP} и для двух значений толщины слоя $h = h_0; h_i$ – текущее значение:

$$\frac{3F_{TP0}L}{\pi a^2} = \mu \frac{v}{h_0}, \quad (1.10)$$

$$\frac{3F_{TPi}L}{\pi a^2} = \mu \frac{v}{h_i},$$

5) взяв отношение выражений (1.10), получаем при L, a, v, μ – постоянные величины:

$$\frac{h_i}{h_0} = \frac{F_{TP0}}{F_{TPi}} \quad (1.11)$$

или

$$h_i = h_0 \frac{(F_{TP})_0}{(F_{TP})_i}. \quad (1.12)$$

1.3.2. Определение параметров (K_w, m) модели изнашивания граничного слоя смазки в реверсивном режиме

1) запишем модель изнашивания (1.2) для двух точек (W_{w1}, h_1, σ_1) (W_{w2}, h_2, σ_2) и фиксируем пути трения S :

$$U_{w1}^c = K_w \sigma_1^m S; \quad (1.13)$$

$$U_{w2}^c = K_w \sigma_2^m S;$$

2) решаем систему (1.13) относительно K_w и m , получаем:

$$m \frac{\lg(U_{w1}^c / U_{w2}^c)}{\lg(\sigma_1 / \sigma_2)}; \quad (1.14)$$

3) напомним, что:

$$U_{w1}^c = h_0 - h_1; \quad (1.15)$$

$$U_{w2}^c = h_0 - h_2;$$

4) при этом по (1.12):

$$h_1 = h_0 \frac{(F_{TP})_0}{(F_{TP})_1}; \quad (1.16)$$

$$h_2 = h_0 \frac{(F_{TP})_0}{(F_{TP})_2};$$

5) из (1.10):

$$K_w = \frac{U_{w1}^c}{\sigma_1^m S}. \quad (1.17)$$

2. Техника эксперимента

2.1. Установка и общая методика испытаний приведена в [1] и [2]

2.2. Порядок испытания и форма представления результатов измерения

1) задаётся нормальная нагрузка Q на шарик, выбирается смазка; выбирается способ задания силы трения F_{TP} – от двигателя или ручной;

2) прикладываются силы трения и измеряют изменения этих сил от числа касаний;

3) результат измерений представляются в таблице значения функции $F_{TP}(n)$.

2.3. Порядок обработки результатов измерений проследим на примере реализации эксперимента 3

2.4. Схема испытаний: вращении шара в сферической полости – требует выборки в форме отверстия рис. 2 в полости отверстия d_0 по оси вращения (рис. 2). При отсутствии испытания искажаются сразу после минимального износа смазки (или полости).

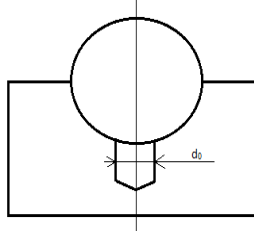


Рис. 2 – Схема выборки в центре контакта

3. Реализация эксперимента

3.1. Опыт 1 – смазка, литол-24; используются данные полученные при испытаниях в работе [2]

3.1.1. Исходные данные

- 1) шар $2R = 30$ мм;
- 2) диаметр $2a = 17$ мм; $a = 8,5$ мм;
- 3) плечо рычага поворотного шара $L = 300$ мм;
- 4) первая нагрузка $Q_1 = 187,5$ кг;
- 5) вторая нагрузка $Q_2 = 500$ кг;
- 6) угол поворота в одну сторону $\Delta \varphi = 15^\circ$;
- 7) путь трения за один ход $\Delta S = L \frac{15}{180} \pi = 26$ мм;
- 8) путь трения за n циклов $S = n \Delta S$; мм.

3.1.2. Результаты испытания

Таблица 3.1

№	$Q_1 = 187,5$ кг; $\sigma_1 = 0,83$ кг/мм ²		$Q_2 = 500$ кг; $\sigma_2 = 2,2$ кг/мм ²	
	$F_{\text{тр}}$, кг	$h_{\text{мм}}^{10^{-3}}$	$F_{\text{тр}}$, кг	$h_{\text{мм}}^{10^{-3}}$
0				
2	0,08	1	0,16	1
10	0,11	0,72	0,46	0,8
30	0,12	0,67	0,51	0,73
100	0,17	0,47	0,54	0,3

3.1.3. Обработка результатов измерений:

1) давление по (1.4):

$$\sigma_1 = \frac{187,5}{\pi 8S^2} = 0,83;$$

$$\sigma_2 = \frac{500}{\pi 8S^2} = 2,2;$$

2) путь трения при $n = 100$:

$$S = 100 \cdot 26 = 2,6 \cdot 10^3 \text{ мм};$$

3) определение толщины слоя смазки:

- при $n = 2 = 1 \cdot 10^{-3}$ мм;

- при $n = 10$ $h_1(10) = \frac{2}{10} \cdot 10^{-3} = \frac{0,8}{0,11} \cdot 10^{-3} = 0,72 \cdot 10^{-3}$ мм;

Аналогично $h_1(10) = \frac{0,08}{0,12} \cdot 1 = 0,67 \cdot 10^{-3}$ мм.

Остальные результаты в табл. 1;

4) для дальнейших расчетов выбираем две точки:

$$h_1(\sigma_1 = 0,83) = 0,47 \text{ ч} 10^{-3};$$

$$h_2(\sigma_2 = 2,2) = 0,3 \text{ ч} 10^{-3};$$

5) для выбранных точек определяется износ по (1.15):

$$U_{w1}^c = 1 - h_1 = 1 - 0,47 = 0,53 \text{ ч} 10^{-3}; \quad \sigma_1 = 0,83;$$

$$U_{w2}^c = 1 - h_2 = 1 - 0,3 = 0,7 \text{ ч} 10^{-3}; \quad \sigma_2 = 2,2;$$

6) определение параметра модели m по (1.14):

$$m = \frac{\lg(U_{w1}^c / U_{w2}^c)}{\lg(\sigma_1 / \sigma_2)} = \frac{\lg 0,53 / 0,7}{\lg 0,83 / 2,2} = \frac{0,121}{0,4233} = 0,286;$$

$$m = 0,286;$$

7) определение параметра R_w по (1.17):

$$K_w = \frac{U_{w1}^c}{\sigma_1^m S} = \frac{0,53 \text{ ч} 10^{-3}}{(0,83)^{0,286} 2,6 \text{ ч} 10^{-3}} = 0,215 \text{ ч} 10^{-6};$$

$$K_w = 0,215 \text{ ч} 10^{-6}.$$

3.2. Опыт – 2 – графитовая смазка

3.2.1. Методика испытаний по п. 3.1 $n = 300$ об/мин

3.2.2. Результаты испытаний в табл. 3.2

Таблица 3.2

t	$\sigma_1 = 0,82 \text{ кг/мм}^2$		$\sigma_2 = 2,2 \text{ кг/мм}^2$	
	$F, \text{ кг}$	h	$F, \text{ кг}$	h
σ	0,3	1	0,3	1
2	0,7	-	1,32	-
10	-	-	-	-
30	-	-	-	-
100	1,14	0,61	3,2	0,41

Базовые точки:

$$h_1(\sigma_1, t = 10) = 0,61 \text{ ч} 10^{-3}; \quad h_2(\sigma_2, t = 6) = 0,41 \text{ ч} 10^{-3};$$

$$U_{w1} = 0,39 \text{ ч} 10^{-3} \text{ мм}; \quad U_{w2} = 0,59 \text{ ч} 10^{-3} \text{ мм}.$$

3.2.3. Определение параметров модели

1) параметры модели:

$$m = \frac{\lg(U_{w1} / U_{w2})}{\lg(\sigma_1 / \sigma_2)} = \frac{\lg(0,39 / 0,59)}{\lg(0,83 / 2,2)},$$

$$m = \frac{0,18}{0,423} = 0,425;$$

$$m = 0,425;$$

$$K_w = \frac{0,39 \text{ ч} 10^{-3}}{0,83^{0,425} 46 \text{ ч} 10^3} = 0,78 \text{ ч} 10^{-7};$$

$$S = 2nt = 2 \cdot 300 \cdot 10 = 6 \text{ ч} 10^3 \text{ мм};$$

$$K_w = 7,8 \text{ ч} 10^{-8} \text{ кг/мм}^2;$$

2) сравнение износа смазок w_1 летол-24 и w_2 графитовая при $\sigma = 2,2 \text{ кг/мм}^2$.

$$\frac{U_{w1}}{U_{w2}} = \frac{K_{w1}}{K_{w2}} \sigma^{m_1 - m_2} = \frac{0,2 \text{ ч} 10^{-6}}{0,78 \text{ ч} 10^{-7}} 2,2^{(0,285 - 0,415)} = 2,8 \text{ раза}.$$

Слой смазки литола изнашивается в 2,8 раза быстрее чем слой графитной смазки.

3.3. Опыт – 3 – Литол-24 + бронзовый порошок

3.3.1. Исходные данные

Методика испытания по (3.1) при $n = 120$ об/мин.

3.3.2. Результаты испытаний

Δt , мин	t , мин	$Q_1 = 100$ кг; $\sigma_1 = 0,44$ кг/мм ²		$Q_2 = 200$ кг; $\sigma_2 = 0,88$ кг/мм ²	
		F , кг	$h \cdot 10^3$ 10 ⁻³	F , кг	$h \cdot 10^3$ 10 ⁻³
0	0	1,14	1	2,0	1
1	1	1,15	1	2,4	1,83
+2	3	1,4	1	2,2	0,91
+3	6	,32	0,84	2,3	0,96
+3	9	1,43	0,96	3,1	0,645
-	-	$U_{w1} = 0,04 \cdot 10^{-3}$		$U_{w2} = 0,355 \cdot 10^{-3}$	

3.3.3. Обработка результатов испытаний

1) определения давления:

$$\sigma_1 = \frac{100}{\pi \cdot 40,82^2} = 0,44 \text{ кг/мм}^2; \quad \sigma_2 = 0,88 \text{ кг/мм}^2;$$

2) параметр m :

$$U_{w1} = 1 - h_1 = 1 - 0,96 = 0,04 \cdot 10^{-4}; \quad h_2 = 1 - 0,645 = 0,355 \cdot 10^{-3};$$

$$m = \frac{\lg 0,04 / 0,355}{\lg 0,5} = \frac{0,948}{0,3} = 3,16;$$

3) путь трения:

$$S = \Delta \cdot \psi_n \cdot \psi_t = 26 \cdot 10^4 \cdot 0,09 = 2,8 \cdot 10^4 \text{ мм};$$

$$K_w = \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{0,44 \cdot 40,173 \cdot 42,8 \cdot 10^4} = \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{0,87 \cdot 42,8 \cdot 10^4} = 0,16 \cdot 10^{-7};$$

$$K_w = 0,16 \cdot 10^{-7} \text{ (мм}^2/\text{кг)}^m.$$

Сравнение литол-24 без порошка и с порошком:

$$\frac{U_{w1} = K_{w1} \sigma^{m_1} S_1}{U_{w2} = K_{w2} \sigma^{m_2} S_2} = \frac{0,215 \cdot 10^{-7} \cdot 40,44^{0,183} \cdot 42,8 \cdot 10^4}{0,16 \cdot 10^{-7} \cdot 40,83^{0,286} \cdot 42,6 \cdot 10^4};$$

4) параметр K_{w1} :

$$K_{w1} = \frac{U_{w1}}{\sigma^{m_1} S_1} = \frac{0,04 \cdot 10^{-3}}{0,075 \cdot 42,8 \cdot 10^4} = 0,2 \cdot 10^{-7} \text{ (мм}^2/\text{кг)}^m.$$

3.3.4. Сравнение смазки литол-24 и литол-24+порошок бронзы по формуле:

$$\frac{U_{w1}}{U_{w2}} = \frac{K_{w1}}{K_{w2}} \cdot \frac{\sigma^{m_1}}{\sigma^{m_2}};$$

1) $m_1 = 0,286$; $K_{w1} = 0,215 \cdot 10^{-6}$;

2) $m_2 = 3,16$; $K_{w2} = 0,2 \cdot 10^{-7}$, $\sigma = 1$ кг/мм²;

3)

$$\frac{U_{w1}}{U_{w2}} = \frac{0,215 \cdot 10^{-6}}{0,2 \cdot 10^{-7}} = 10 \text{ раз};$$

4) вывод износ граничной смазки литол-24 без добавления бронзового порошка в 10 раз больше чем износ с порошком.

4. Рейтинги пластических смазок по износу в реверсивном режиме

4.1. Способ приближенной сравнительной экспресс-оценки износа пластических смазок в реверсивном режиме

4.1.1. Порядок испытания

1. На описанной выше установке в самом начале испытаний измеряется сила трения $F_{TR0}^{\sigma_{yx}}$ без смазки в шарнире при двух режимах нагрузки Q_1 и Q_2 , $F_{Q_2}^{\sigma_{yx}}(t = t_1) = F_{Q_2}^{\sigma_{yx}}(t = 0)$, $F_{Q_2}^{\sigma_{yx}}$.

2. Шарнир смазывается при заданной смазке измеряется начальная сила трения со смазкой при двух нагрузках $F_{Q_1}^{\sigma_{yx}}$, $F_{Q_2}^{\sigma_{yx}}$.

3. При заданной частоте n и амплитуде $\Delta\varphi$ производится испытания с периодически измеряются силы трения $F_{Q_1}^{\sigma_{yx}}(t)$, $F_{Q_2}^{\sigma_{yx}}(t)$.

4. Испытания с периодическим замером сил трения продолжается с силами Q_1 и Q_2 до момента, когда сила трения станет равной силе трения без смазки:

$$F_{Q_1}^{\sigma_{yx}}(t = t_1) = F_{Q_1}^{\sigma_{yx}}(t = 0); \quad (4.1)$$

$$F_{Q_2}^{\sigma_{yx}}(t = t_1) = F_{Q_2}^{\sigma_{yx}}(t = 0). \quad (4.2)$$

5. Моментам t_1, t_2 , соответствуют циклы реверсирования N_1, N_2 ; величина t_1, t_2 или N_1, N_2 принимаются за меру износостойкости смазки.

4.2. Критерии износостойкости смазки

4.2.1. Критерий 1: 1) сравнение смазок по приближенному определенному износу смазок U_w по методу 1.3.2; 2) недостаток метода в использовании допущений при определении толщины масляной пленки при износе; допущение 1 – принято, что начальная толщина граничной смазки $h_0 = 1$ мкм; допущение 2 – изменение толщины слоя пропорциональное силе трения по (1.12).

Критерий 2: сравнение смазок по продолжительности испытаний до выполнения условий (4.1), (4.2), т.е. до момента, когда сила трения после работы со смазкой станет начальной силой трения без смазки.

Критерий 3: 1) сравнение смазок по суммарной работе трения A_{TP} , затраченной на износ смазки:

$$A_{TP} \propto \int F_{TRi} S_i;$$

2) приближенно при одинаковых S_i сравнение смазок по сумме сил трения до выполнения условий (4.1), (4.2).

Замечание 1: 1) при определении критерия 2 для разных смазок можно использовать график зависимости $F(t)$ до пересечения с уровнем $F = F_0^{\sigma_{yx}}$;

2) в случае, если линия $F(t)$ не пересечет $F_0^{\sigma_{yx}}$, можно применить визуальную экстраполяцию.

4.3. Результаты испытаний пластических смазок на износ

1) по описанной методике были испытаны на износ некоторые основные смазки;

2) результаты испытаний представлены в таблице при $Q = 100$ кг.

3) испытаны разные наиболее часто используемые на практике смазки при общей нагрузке 100 кг, что соответствует давлению $0,44 \text{ кг/мм}^2 = 44 \text{ кг/см}^2$.

В качестве критерия износостойкости принят а) продолжительность в мин t_1 работы узла до полного истирания смазки U ; б) число повторных циклов N_1 до этого же состояния

Из рассмотренных результатов табл. 4.1 следует, что наименьшая износостойкость $t_1 = 1$ мин у смазки солидол ж.

Наибольшая износостойкость у смазок Mobil $t_1 = 38$ мин и Castrol $t_1 = 30$ мин.

Для остальных смазок износостойкость находится в диапазоне $t_1 = 1 - 30$ мин.

При выборе смазок можно ориентироваться на результаты проведенных испытаний.

Предложен метод испытаний на износ граничной смазки с определением параметров модели.

Таблица 4.1

Результаты испытаний разных смазок

№	Название смазки	t_1 , мин	N_1 , цикл
1	Mobil	38	12 200
2	Castrol	30	9 600
3	Графитная ж	25	8000
4	Retinax	20	6 400
5	Графитная универсальная	11	5 500
6	Литол – 24	11	3 520
7	Литневая густая	10	3 200
8	Mehr zweck	8,2	2 600
9	Шрус	8,0	2 500
10	Купрум спрей	6,14	1 960
11	Литол – 24+бронзовый порошок	4,0	1 200
12	Солидол	1,0	320

Метод включает:

1. Модель процесса изнашивания:

1) содержит зависимость износа от двух факторов: давления и пути трения;

2) модель содержит K_w^c , m^c , оприделения из эксперимента.

2. Испытания граничной смазки на износ выполняется по схеме шар - сферическая полость условия реверсивного верчения шара.

3. Изменения толщины слоя граничной смазки определяется как величина пропорциональная силе трения.

4. Процедура испытаний и определения параметров модели показано на примерах смазок Литол - 24 и граничной смазки.

5. Предложенный метод определения износа граничной смазки рекомендуется использовать для определения периодичности смазывания узлов трения в эксплуатации.

6. Параметры модели изнашивания смазки можно использовать как новые характеристики смазок.

7. Испытаниями распространенных пластических смазок определен рейтинг этих смазок по износостойкости от солидола до мобила. Этот результат может использоваться на практике для выбора смазки для проектируемого узла.

8. Предложенный метод испытаний может использоваться для оценки эффективности мероприятий по повышению износостойкости пластических смазок, на пример таких как канавки.

Литература

1. Кузьменко А.Г Прикладная теория методов испытаний на износ. Теоретическая и экспериментальная трибология VI : монография. – Хмельницкий: ХНУ. – 2007. – 579с.

2. Кузьменко А.Г Новые методы и результаты исследований адгезионно - деформационной теории трения (АДД ТТ) // Проблемы трибологии. – 2012. – №1. – С. 120-134.

Поступила в редакцию 11.11.2013

Kuzmenko A.G. **The method and test results for wear greases in reverse mode.**

A model of the test method and lubricants for wear with the definition of parameters of the models wear. Submitted test basic greases wear with building their durability rating.

This method is recommended for widespread use in practice quality assessment greases.

Key words: plastic lubricants, wear testing method, the calculation of lubricants for wear.

References

1. Kuzmenko A.G. Prikladnaja teorija metodov ispitaniy na iznos. Teoreticheskaja i eksperimentalnaja tribologija VI, monografija. Hmelnickij, HNU, 2007. 579s.
2. Kuzmenko A.G. Novye metodi i rezultaty issledovanij adgezionno - deformacionnoj teorii trenija (ADD TT). Problemy tribologii. 2012. №1, s. 120-134.