

УДК 620.178.16.004

## **ИЗНОС МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ СОПРЯЖЕНИЯ ТИПА ВАЛ- ВТУЛКА ПРОДОЛЬНОГО ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В СРЕДЕ БИОТОПЛИВА**

Журавель Д.П., к.т.н.

Юдовинский В.Б., к.т.н.

*Таврический государственный агротехнологический университет*

Тел. (0619) 42-13-54

***Аннотация*** – работа посвящена установлению аналитической зависимости коэффициента износа материалов деталей сопряжения типа вал-втулка продольного относительного перемещения в среде биотоплива.

***Ключевые слова*** – коэффициент износа, интенсивность изнашивания, угол контакта, суммарный износ.

*Постановка проблемы.* Прогнозирование ресурса работы узлов и агрегатов мобильной техники возможно при наличии обобщенного показателя поведения материалов деталей сопряжения, то есть коэффициента износа. Коэффициент износа  $K_U$  – это характеристика свойств материалов деталей сопряжений и условий изнашивания, который зависит от распределения давлений по поверхности контакта элементов сопряжения, пути трения и конструктивной формы сопряжения, определяющей его принадлежность к тому или иному типу согласно классификации по условиям трения и износа[3].

*Анализ последних исследований.* Вопросам износа материалов различных сопряжений посвящено много работ [1-7]. Однако они носят, в основном, экспериментальный характер, что затрудняет их использование при прогнозировании ресурса.

*Формирование цели статьи.* Целью статьи является установление аналитической зависимости определения коэффициента износа материалов деталей сопряжения типа вал-втулка продольного относительного перемещения в среде биотоплива.

*Основная часть.* Сопряжения типа вал-втулка продольного перемещения относятся к четвертой группе классификации [1]. В этом случае имеет место неравномерный износ поверхности втулки и вала в продольном сечении.

Износ деталей сопряжения связан с условиями работы. Так при радиальном нагружении втулки или вала износ втулки будет односто-

ронный и зависит от геометрических параметров втулки и вала, а также от условий нагружения.

Форма изношенной поверхности втулки  $U(\alpha)$  является результатом неравномерного распределения работы трения по длине дуги контакта втулки.

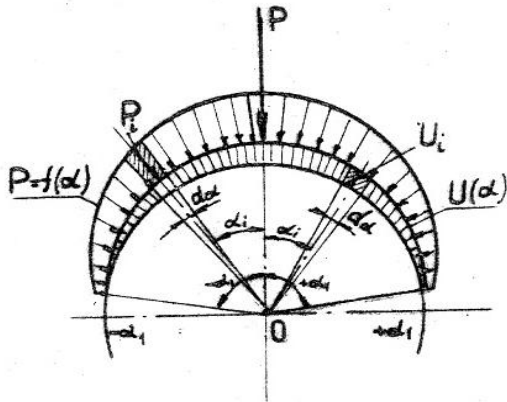


Рис.1. Расчетная схема соприяжения типа вал-втулка в радиальном сечении

Если приравнять количество затраченной работы трения  $A_1$  и работы  $A_2$ , необходимо для образования износа, ограниченного кривой  $U(\alpha)$ , где  $A_1$ —работа трения, возникающая в соприяжении вал-втулка при их относительном перемещении (вращении) и действия давления, а  $A_2$ —работа, затрачиваемая на износ втулки под действием сил трения, то получим равенство, из которого можно определить коэффициент износа.

Элементарная затраченная работа трения  $dA_1$  при относительном перемещении деталей соприяжения является произведением коэффициента трения, пути трения и функции распределения давления.

$$dA_1 = \mu \cdot R \cdot \varphi \left[ f(\alpha) R_1 \cdot \frac{\cos \alpha}{d} \cdot d\alpha \right], \quad (1)$$

где:  $\mu$  - коэффициент трения;

$R_1$  - радиус шипа вала;

$\varphi$  - угол поворота шипа (вала);

$f(\alpha)$ -функция распределения нормальных давлений;

$\alpha$  - половина угла контакта.

Вся работа трения при относительном перемещении деталей соприяжения выражается зависимостью

$$A_1 = \frac{\mu}{a} \cdot R_1^2 \cdot \varphi \int_{-\alpha_1}^{+\alpha_1} f(\alpha) \cdot \cos d_\alpha = \frac{\mu \cdot R_1^2 \cdot \varphi \cdot P}{a}, \quad (2)$$

где:  $P$  - реакция во втулке;

$a$  – ширина втулки.

$$P = \int_{-\alpha_1}^{+\alpha_1} f(\alpha) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha \quad (3)$$

элементарная работа трения  $dA_2$ , затраченная на износ по дуге контакта  $\alpha_i$ , будет

$$dA_2 = \frac{\mu \cdot a \cdot U_i(\alpha) d\alpha}{K_U(\alpha)} = \frac{\mu \cdot a \cdot U_i \cdot (U_i + R_2) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha}{K_U(\alpha)}. \quad (4)$$

Здесь  $\left[ \frac{K_U(\alpha)}{\mu} \right]$  показывает, на сколько микрометров износится данный элемент поверхности при затрате единицы работы трения.

Интегрируя последнее выражение и принимая, что коэффициент износостойкости не является постоянным по всей дуге контакта из непостоянства условий трения, получим значение работы  $A_2$ .

$$A_2 = \mu \cdot a \int_{-\alpha_1}^{+\alpha_1} \frac{U_i(\alpha)}{K_U(\alpha)} \cdot d\alpha = \mu \cdot a \int_{-\alpha_1}^{+\alpha_1} \frac{U_i(U_i + R_2) \cos \alpha \cdot d\alpha}{K_U(\alpha)}, \quad (5)$$

Где:  $F_U = \int U_i(U_i + R_2) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha = U_2(U_2 + R_2) \cdot \sin \alpha$  - площадь,

заключенная между первоначальным внутренним контуром втулки и контуром ее после износа.

Для максимального значения износа втулки  $U_1 = U_2$ .

Тогда элементарная площадь, заключенная между первоначальным контуром втулки и контуром ее после износа (площадь поперечного сечения износа), определяется зависимостью

$$dF_U = U_2(U_2 + R_2) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha. \quad (6)$$

Проинтегрируем это выражение и получим полную площадь поперечного сечения износа

$$dF_U = U_2(U_2 + R_2) \cdot \sin \alpha \quad (7)$$

Подставив это значение в уравнение работы, получим

$$A_2 = \frac{\mu \cdot a \cdot U_2(U_2 + R_2) \cdot \sin \alpha}{K_U(\alpha)}. \quad (8)$$

Приравняв равенство работ, получим коэффициент износа материалов деталей сопряжения вал-втулка, как функцию угла контакта

$$\frac{\mu \cdot R_1^2 \cdot \varphi \cdot P}{a} = \frac{\mu \cdot a \cdot U_2 (U_2 + R_2) \cdot \sin \alpha}{K_U(\alpha)}; \quad (9)$$

$$K_U(\alpha) = \frac{4a^2 \cdot U_2 (U_2 + R_2) \cdot \sin \alpha}{D_1 \cdot S \cdot P}, \frac{\text{мкм}}{\text{Па} \cdot \text{км}}. \quad (10)$$

Коэффициент износа материалов деталей сопряжения типа вал – втулка показывает, на сколько микрометров изнашивается втулка радиусом  $R_2$  при контакте с валом диаметром  $D_1$  на пути трения  $S$  и давлении  $P$ .

Износ вала происходит за счет перемещения втулки по валу.

Рассмотрим форму продольного сечения износа вала в радиальном сечении в плоскости максимального нагружения в зависимости от их конструктивных особенностей и законов кривых распределения длины хода втулки.

В зависимости от закона распределения длин ходов втулки все виды подобных сопряжений можно разделить на две группы:

- сопряжения с нормальным законом распределения длины хода втулки;
- сопряжения с логарифмически нормальным распределением длины хода втулки;

Для **первой группы**, принимая, что кривая распределения ходов  $\varphi(x)$  подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием приложения реакции на втулке  $a_i = l_p$  закон вероятности выражается зависимостью:

$$\varphi(X) = Mi(X) = \frac{M_i}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[ -\frac{(X - a_i)^2}{2\sigma_L^2} \right] \quad (11)$$

где  $a_i$  – координата центра группировки ходов втулки;

$\sigma_L$  – среднеквадратическое отклонение;

$M_i$  – нормирующий множитель, выбираемый условия равенства единице всей площади под кривой распределения в заданной области значения, определяемой с помощью значений функции Лапласа.

$$M = \frac{1}{\Phi\left(\frac{a_i}{\sigma_L}\right) + \Phi\left(\frac{L - a_i}{\sigma_L}\right)}. \quad (12)$$

Принимая, что продольное сечение износа втулки является зеркальным отражением площади, ограниченной кривой распределения ходов, растянутой в  $m$  раз, то есть на отношение  $\left[\frac{L_k}{L} = m\right]$  полной дли-

ны изнашивания вала на длину распределения ходов втулки (рис.1.), получим:

$$F_U = m \int_0^L \varphi(x) dx. \quad (13)$$

Тогда, подставив в это выражение значение функции  $\varphi(x)$ , получим площадь максимального сечения износа вала

$$F_U = \frac{M_i m}{\sigma_L \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int \exp \left[ -\frac{(x - a_i)^2}{2\sigma_L^2} \right] \cdot dx \quad (14)$$

Или через функцию Лапласа

$$F_U = \frac{M_i \cdot m}{2} \cdot \left\{ \Phi_0 \left[ \frac{L - a_i}{\sigma_L} \right] - \Phi_0 \left[ \frac{a_i}{\sigma_L} \right] \right\} \quad (15)$$

Максимальная величина износа вала  $U_{\max}$ , как ордината наиболее вероятной величины зеркального отражения максимальной ординаты кривой распределения длины втулки (рис.2.) может быть выражена уравнением

$$U_{\max} = \frac{M_{i \cdot m}}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \quad (16)$$

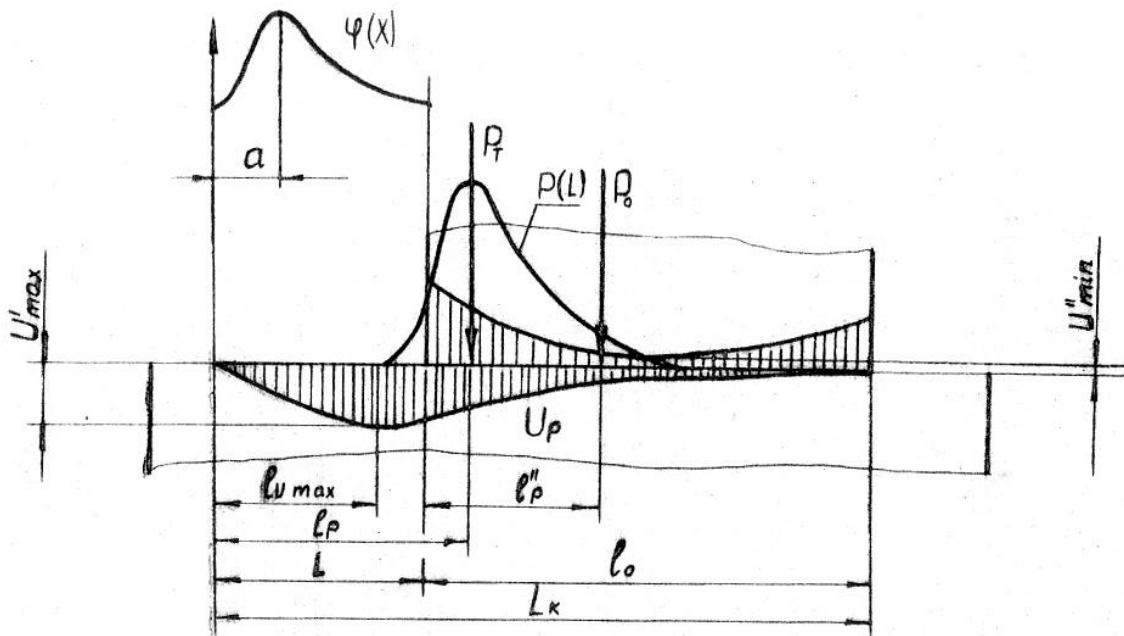


Рис. 2. Вероятность приложения реакции нагружения  $P_T$  вала и эпюры износов вала и втулки от распределения длины ходов втулки.

Подставив значение  $U_{max}$  в выражение  $F_U$  получим

$$F_U = U_{max} \cdot \sigma_L \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left\{ \Phi_0 \left[ \frac{L - a_i}{\sigma_L} \right] - \Phi \left[ \frac{a_i}{\sigma_L} \right] \right\} \quad (17)$$

Принимая критические значения деформаций абразивным зерном поверхности изнашиваемого металла [2] при наличии загрязненности среды и учитывая, что коэффициент износа материалов, выведенный А.С.Прониковым [1] описывается зависимостью

$$K_U = \frac{F_U \cdot b}{S \cdot P}, \frac{мкм}{Па \cdot км}, \quad (18)$$

где  $F_U$  - площадь максимально продольного износа вала,  $мкм \cdot м$ ,

$b$  - ширина втулки,  $м$ ,

$S$  - путь трения,  $км$ ,

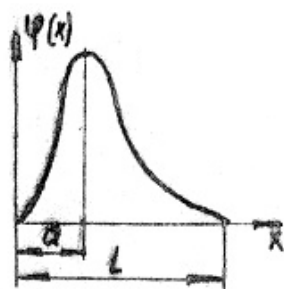
$P$  - удельное давление,  $Па$ .

Тогда можно получить уравнение для определения коэффициента износа материалов вала с учетом законов распределения ходов втулки

$$K_U = \frac{0,42 \cdot \sigma_L \cdot \cos \frac{\Theta}{2}}{L_K \cdot (HB)} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left\{ \Phi_0 \left[ \frac{L - a_i}{\sigma_L} \right] - \Phi \left[ \frac{a_i}{\sigma_L} \right] \right\}, \frac{мкм}{Па \cdot км} \quad (19)$$

Таким образом, коэффициент износа материалов вала при нормальном законе распределения длины ходов втулки является функцией свойств материала, характеристики абразива среды, конструктивных параметров ( $L_K = L + l_0$ ) и функции распределения ходов втулки.

Для второй группы, распределение длин ходов втулки аппроксимируется логарифмически нормальным законом распределения. Плотность распределения ходов втулки можно записать в виде

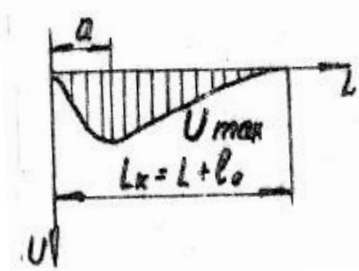


$$\varphi(x) = M \cdot \varphi_0(x) = \frac{M}{x \sigma_L \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[ -\frac{(\ln x - a)^2}{2\sigma_L^2} \right], \quad (20)$$

где нормирующий множитель « $M$ » можно определить с помощью значений функции Лапласа

$$M = \frac{1}{\Phi_0\left(\frac{a}{\sigma_L}\right) + \Phi\left(\frac{\ln - a}{\sigma_L}\right)}. \quad (21)$$

Принимая, что площадь продольного сечения износа вала является зеркальным отражением площади, ограниченной кривой распределения ходов втулки, увеличенной в  $m$  раз, где  $m = \frac{L_K}{L} = \frac{L + l_0}{L}$  - отношение длины изнашивания направляющей на максимальную величину перемещения (Рис.2), можно записать



$$F_{U1} = m \int_0^L \varphi(x) = M \cdot m \int_0^L \varphi_0(x). \quad (22)$$

Подставив в это уравнение значение функции  $\varphi_0(x)$ , получим

$$F_{U1} = \frac{M \cdot m}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^L \exp\left[-\frac{(\ln L - a)^2}{2\sigma_L^2}\right] \cdot dx \quad (23)$$

После интегрирования получим площадь продольного сечения максимального износа вала, выраженную через функции Лапласа

$$F_{U1} = \frac{M \cdot m}{2} \left\{ \Phi_0\left[\frac{\ln L - a}{\sigma_L}\right] - \Phi_0\left[\frac{1 - a}{\sigma_L}\right] \right\}. \quad (24)$$

Величина максимального износа  $U_{\max}$  определяется частным случаем, когда  $L=a$  в функции  $\varphi_0(x)$

$$U_{\max} = \frac{M \cdot m}{L \cdot \sigma_L \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln a - a)^2}{2\sigma_L^2}\right]. \quad (25)$$

Подставив значение максимального износа  $U_{\max}$  в формулу площади сечения  $F_{U1}$ , получим

$$F_{U1} = U_{\max} \cdot \frac{L \cdot \sigma_L}{\exp\left[-\frac{(\ln a - a)^2}{2\sigma_L^2}\right]} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2} \left\{ \Phi_0\left[\frac{\ln L - a}{\sigma_L}\right] - \Phi\left[\frac{1 - a}{\sigma_L}\right] \right\}}. \quad (26)$$

Зная уравнение площади сечения износа по приведенным выше формулам аналитического определения максимального износа и зависимости А.С. Проникова, коэффициент износа материалов вала определяется выражением

$$K_U = \frac{0,42L\sigma_L \cos \frac{\Theta}{2}}{L_K (HB) \cdot \exp \left[ -\frac{(\ln a - a)^2}{2\sigma_L} \right]} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \left\{ \Phi_0 \left[ \frac{\ln L - a}{\sigma_d} \right] - \Phi_0 \left[ \frac{1 - \phi}{\sigma_d} \right] \right\} \quad (27)$$

Применение биотоплива в контакте изнашиваемых деталей сопряжений, снижают численное значение коэффициента износа на 10-13 % по отношению к среде нефтяного топлива.

Большое значение на величину износов деталей сопряжения, работающих в среде биотоплива, оказывает время простоя. Это объясняется воздействием метанолов биотоплива в статическом состоянии. Зависимость приращения износа от времени простоя сопряжения представлены на рис.3.

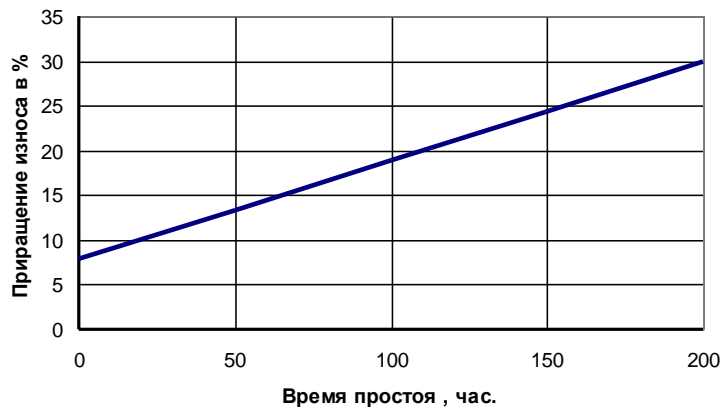


Рис.3 Влияние времени простоя на приращение износа в процентах.

Таким образом, наличие биотоплива в зоне изнашивания деталей сопряжений при наличии простоев, приводит к общему увеличению изнашивания деталей сопряжений и повышению численных значений коэффициентов износа.

Зависимость примет вид:

- для сопряжения с нормальным законом распределения длины ходов втулки;

$$K_U = \frac{0,42 \cdot \sigma_L \cdot \cos \frac{\Theta}{2} \cdot \left( 1 + \frac{\beta}{100} \right)}{L_K \cdot (HB)} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left\{ \Phi_0 \left[ \frac{L - a_i}{\sigma_L} \right] - \Phi \left[ \frac{a_i}{\sigma_L} \right] \right\} \quad (28)$$



- для распределение длин ходов втулки с логарифмически нормальным законом распределения.

$$K_U = \frac{0,42L\sigma_L \cos \frac{\Theta}{2} \cdot \left(1 + \frac{\beta}{100}\right)}{L_K(HB) \cdot \exp\left[-\frac{(\ln a - a)^2}{2\sigma_L}\right]} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \left\{ \Phi_0\left[\frac{\ln L - a}{\sigma_D}\right] - \Phi_0\left[\frac{1 - \phi}{\sigma_D}\right] \right\} \quad (29)$$

где  $\beta$  – процент приращения коэффициента износа за счет простоев.

*Выводы.* 1. Полученные зависимости коэффициентов износа позволяют учитывать силовые, скоростные параметры работы деталей сопряжений типа вал-втулка, а также влияние абразивности загрязнений и влияние метанолов биотоплива в процессе работы.

2. Не смотря на уменьшение изнашивания материалов в среде биотоплива общий износ деталей сопряжений при наличии простоев, приводит к общему увеличению изнашивания деталей сопряжений и повышению численных значений коэффициентов износа.

3. Предложенные коэффициенты износа упрощают общую методику прогнозирования ресурса сопряжений тапа вал-втулка относительного перемещения.

Литература:

1. Журавель Д.П. Прогнозування ресурсу трибоспряжень мобільних сільськогосподарських агрегатів / Д.П. Журавель, В.Б. Юдовінський, С.В. Кюрчев // Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. - Вип. 75, Харків, ХНТУСГ. – 2008. – с. 11-22.
2. Журавель Д.П.- Моделювання хімотологічних та триботехнічних процесів в спряженнях тертя / Д.П. Журавель, В.Б. Юдовінський // Праці ТДАТА. – Мелітополь, 2007. – Вип.7. Том 3. – с.30-38.
3. Юдовинский В.Б.- Обоснование комплексного показателя износостойкости материалов / В.Б. Юдовинский, Д.П. Журавель, К.Г. Петренко // Научные труды ТДАТА. -Мелитополь, 2006. -Вып.42.-с.15-20.
4. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах /Б.И.Костецкий “Техніка”, 1970.- 396с.
5. Юдовінський В.Б., Журавель Д.П., Савченко О.Д. Дослідження процесу зношування основних сполучень деталей сільськогосподарської техніки через коефіцієнт зносу./В.Б.Юдовинский, Д.П.Журавель,

О.Д.Савченко// Праці ТДАТА. Вип. 15. – Мелітополь, 2003. – с.24-29.  
6. Юдовинський В.Б., Журавель Д.П. Еквівалентні коефіцієнти зносу і критерії припрацювання деталей сполучень сільськогосподарської техніки / В.Б.Юдовинський, Д.П.Журавель// Праці ТДАТА. Вип.15. – Мелітополь 2003. С.29-33.

7. Юдовинський В.Б., Журавель Д.П. Теория разрушения поверхностных слоев металла при трении/ В.Б.Юдовинский, Д.П.Журавель // Праці ТДАТА. Вип.33. – Мелітополь 2005. С.103-106.

## **ЗНОС МАТЕРІАЛІВ ДЕТАЛЕЙ СПРЯЖЕНЬ ТИПУ ВАЛ - ВТУЛКА ПОВЗДОВЖНЬОГО ВІДНОСНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ В СЕРЕДОВИЩІ БІОПАЛИВА**

Журавель Д.П., Юдовинський В.Б.

### *Анотація*

**Робота присвячена встановленню аналітичної залежності коефіцієнту зносу матеріалів деталей спряжень типу вал-втулка повздовжнього відносного переміщення в середовищі біопалива.**

## **DETERIORATION OF MATERIALS OF DETAILS OF INTER- FACES OF TYPE SHAFT - THE PLUG LONGITUDINAL RELA- TIVE MOVING IN THE ENVIRONMENT OF BIOFUEL**

D. Juravel, V. Yudovynskyuy

### *Summary*

**Work is devoted to establishment of analytical dependence of factor of deterioration of materials of details of interfaces of type a shaft-plug of longitudinal relative moving in the environment of biofuel.**