

**Кузьменко А.Г.**Хмельницкий национальный университет,  
г. Хмельницкий, Украина  
E-mail: tribosenator@gmail.com**СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ, КОЭФ-  
ФИЦИЕНТА ЧАСТИ РАБОТЫ ТРЕНИЯ, ВЫ-  
ЗЫВАЮЩЕЙ ИЗНАШИВАНИЕ ПОВЕРХНО-  
СТИ (КПЧ)**

УДК 621.891

Научная ценность предложенных способов определения коэффициента повреждающей части работы трения является мировоззренческой и состоит в установлении соотношения величин энергетических потоков при трении поверхности трибологических систем. Обоснованные порядки оценок поврежденной части работы трения позволяет строить более достоверные энергетические модели изнашивания. Получено теоретически, что износ обратно пропорционален твердости, что является предельной удельной работой трения.

**Ключевые слова:** коэффициент трения, изнашивание, предельная энергия, твердость.

**1. Первый способ** оценки КПЧ (коэффициент повреждающей части работы трения)

Первая оценка коэффициента повреждающей части работы трения (КПЧ). В известных энергетических моделях процесса изнашивания Фляйшера Погодаева и др. принимается допущение о равенстве работы трения  $A_F$  и изнашивания  $A_w$ . В тоже время известно, что работа трения расходуется не только на износ но и на нагрев, вибрации, шум, электризацию и т.д.

В работе [1] нами была предложена гипотеза о том что работа идущая на изнашивание может быть определена как производные нормальные нагрузки в контакте на перемещение, равное износу поверхности по нормали  $U_w$ :

$$A_w = N \cdot U_w. \quad (1.1)$$

Далее в [1] введено понятие коэффициенты повреждающей части работы трения  $\xi$  (ППЧ):

$$\xi = \frac{A_w}{A_F}, \quad (1.2)$$

где работа трения равна произведению силы трения  $F$  на путь трения  $S$ :

$$A_F = F \cdot S, \quad (1.3)$$

с учетом (1) и (3) из (2) имеем:

$$\xi = \frac{N \cdot U_w}{F \cdot S}. \quad (1.4)$$

Замечая, что в этом выражении величина:

$$\frac{U_w}{S} = Ih, \quad (1.5)$$

есть интенсивность изнашивания поверхности, а

$$\frac{N}{F} = f, \quad (1.6)$$

где  $f$  эффективность трения.

С учетом (1.5), (1.6), (1.4) имеем:

$$\xi = \frac{Ih}{f}. \quad (1.7)$$

Полученное выражение позволяет дать первую количественную оценку коэффициента повреждающей части работы трения.

Величина интенсивности изнашивания  $Ih$  находится в пределах:

$$Ih = 10^{-3} - 10^{-13}, \quad (1.8)$$

если принять величину коэффициента трения  $f$  в пределах:

$$f = 0,01 - 1. \quad (1.9)$$

В итоге имеем первую оценку величины  $\xi$ :

$$\xi = 10^{-3} - 10^{-15}. \quad (1.10)$$

Отмечая очень широкий диапазон возможных значений  $\xi$  можно определить ориентировочные средние значение при  $Ih = 10^{-10}$  и  $f = 0,01$ ;  $\xi = 10^{-11}$ .

## 2. Второй способ оценки КПЧ

В соответствии с общим законом сохранения энергии в применяемом к работе трения имеем:

$$A_F = A_W + A_Q + A_{\Sigma i}, \quad (2.1)$$

где  $A_F$  – работа трения;

$A_W$  – работа изнашивания;

$A_Q$  – работа расходуемая на нагревания трибосистемы;

$A_{\Sigma i}$  – другие формы потери работы трения.

Полагая  $A_{\Sigma i} \approx 0$  из (3.1) имеем:

$$A_F = A_W + A_Q. \quad (2.2)$$

Принимая работу трения по (1.3), а работу изнашивания по (1.1) из (2.2) имеем:

$$FS = NU_w + A_Q. \quad (2.3)$$

Разделив слева и справа на  $FS$ , имеем:

$$1 = \frac{NU_w}{FS} + \frac{A_Q}{FS}, \quad (2.4)$$

или с учетом (1.2):

$$\xi = 1 - \frac{A_Q}{FS}. \quad (2.5)$$

Для определения  $\xi$  по (2.5) необходимо знать величину той части работы трения, которая превращается в тепло. Например по данным [2] при трении во время работы тепло превращается 99,5 % работы трения, тогда из (2.5) имеем:

$$\xi = 1 - 0,445 = 0,005 = 5 \cdot 10^{-3}. \quad (2.6)$$

Это вторая частная оценка коэффициента повреждающей части работы трения. На нижней границе диапазона  $\xi = 10^{-3}$ ; эти оценки стыкуются.

Таким образом грубо приближенно повреждающая часть работы трения составляет тысячную долю от общей работы трения. Из (2.5) следует, что:

1) при  $A_Q = FS$ ;  $\xi = 0$ ; то если вся работа трения переходит в тепло работа повреждаемости равна нулю;

2) при  $A_Q = 0$ ;  $\xi = 1$ ; то вся работа трения тратится на повреждаемость;

3) с другой стороны при  $A_Q = 0$  из (1.7) следует первая оценка величины  $\xi$ .

## 3. Третий способ оценки КПЧ.

### 3.1. Принцип третьего способа оценки

1) при определении КПЧ необходимо знать две величины: работу трения  $A_F$  и часть этой работы затрачивается на износ  $A_W$  или на  $A_Q$  другие потери, например на теплообразования тогда:

$$\xi = \frac{A_W}{A_F} \text{ или } \xi = \frac{A_F - A_Q}{A_F}; \quad (3.1)$$

2) другой путь определения работы расходуем на износ состоит в определении затрат необходимых для реализации износа или иными словами или предельная энергия, вызывающая износ;

3) в качестве предельной величины вызывающей износ примем энергию или работу трения приходящуюся на единицу объёма  $V_w$  изношенного материала:

$$A_{V_w}^* = \frac{A_F}{V_w} \cdot \frac{\text{КГ} \cdot \text{ММ}}{\text{ММ}^3} = \frac{\text{КГ}}{\text{ММ}^2}; \quad (3.2)$$

4) в работе [1] показано, что удельной работе соответствует твёрдость материала по Брипелю:

$$A_{FV}^* : HB \text{ кг/мм}^2 \text{ кг/мм}^2; \quad (3.3)$$

5) с учетом сказанного величина КПЧ может быть определена из соотношения:

$$\xi = \frac{HB}{A_F / V_w} = \frac{HB}{S \cdot F / V_w}, \quad (3.4)$$

$$\frac{S \cdot F}{V_w} = \frac{\text{кг} \cdot \text{мм}}{\text{мм}^3} = \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}, \quad (3.5)$$

$$A_F F \cdot S = N \cdot f \cdot S; \quad (3.6)$$

6) в (3.4) в числителе  $HB$  - имеет смысл плотности pedalного количества энергии, введенной в единицу объёма части материала удаленной с поверхности при износе;

7) в знаменателе (3.3) плотность всей энергии трения введенной в единицу удаленного объёма;

### 3.2. Пример определения КПЧ по третьему способу

1) в работе [4] приведены данные об удельной работе изнашивания шариков из стали ШХ-15 при испытаниях на износ ЧШМ при разных видах смазки;

2) например для гидравлической смазки ВНИН НП 403:

$$A_{FV} = 45,3 \cdot 10^{15} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2 \cdot 10^8} \right] = 45,3 \cdot 10^8 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} \text{ кг/мм}^2;$$

$$\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \frac{0,1 \text{ кг}}{\text{м}^2 = 10^6 \text{ мм}^2} = \frac{\text{кг}}{10^7 \text{ мм}^2};$$

$$45,3 \cdot 10^{15} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = 45,3 \cdot 10^8 \text{ кг/мм}^2;$$

3) при  $HB = 48 \cdot \text{кг/мм}^2$ :

$$\xi = \frac{HB}{A_{FV}} = \frac{48,0 \text{ кг/мм}^2}{45,3 \cdot 10^8 \text{ кг/мм}^2} = 1,05 \cdot 10^{-8};$$

$$\xi = 1,05 \cdot 10^{-8}.$$

Диапазон измерения  $\xi$  для семи разных масел с использованием данных [4] находятся в диапазоне:

$$\xi = (1 - 40) \cdot 10^{-8}$$

при трении на ЧШМ шариков из ШХ-15.

## 4. Практическое использование третьего способа определения КПЧ

### 4.1. Основное соотношения третьего способа может быть представленным

1) в виде: 
$$\xi = \frac{HB \cdot V_w}{N \cdot f \cdot S}; \quad (4.1)$$

2) или 
$$V_w = \frac{\xi \cdot N \cdot f \cdot S}{HB}; \quad (4.2)$$

3) выражения (4.2) представляет собой зависимость объёмного износа от четырех основных факторов влияющих на износ:

- $N$  нормальной нагрузки на сопряжения;
- $f$  коэффициента трения;
- $S$  пути трения;
- $HB$  твёрдости изнашиваемой поверхности;

4) при этом предполагается что известна  $\xi$  величина коэффициента повреждающей части работы трения;

5) заметим, что зависимость износа от  $N$ ,  $f$ ,  $S$  прямо пропорциональная;

6) зависимость от твёрдости обратно пропорциональная.

**4.2. Связь объёмного износа  $V_w$  с износом  $h$  по нормали к изнашиваемой поверхности**

1) объём шарового сегмента [5]

$$V_w = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h^2 (3 \cdot R - h); \quad (4.3)$$

или при  $h, R$ :

$$V_w = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h^2 \cdot 3 \cdot R = \pi \cdot h^2 \cdot R, \quad (4.3)$$

отсюда имеем:

$$h = \left( \frac{V_w}{\pi \cdot R} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (4.4)$$

2) (4.4)  $\rightarrow$  (4.2)  $\Rightarrow$ 

$$h = \left( \frac{\xi \cdot N \cdot f \cdot S}{HB \cdot \pi \cdot R} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4.5)$$

**4.3. Твёрдость  $HB$  и размерный износ**

1) из (4.5) следует, что размерный износ поверхности для двух разных поверхностей определяется соотношением:

$$\frac{h_1}{h_2} = \left( \frac{HB_2}{HB_1} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4.6)$$

2) (4.6) представляет практический интерес при выборе материала с заданной твёрдостью.

**5. Выводы**

**5.1. По первому способу** коэффициент повреждающей части работы трения (КПЧ) определить зная интенсивность изнашивания  $I_h$  и коэффициент трения  $f$  по зависимости:

$$\xi = \frac{I_h}{f}. \quad (5.1)$$

В этом случае диапазон КПЧ находится в пределах  $\xi = 10^{-3} - 10^{15}$ .

**5.2. По второму способу** величина КПЧ зависит от объёма поглощаемого тепла при трении. Для точного определения КПЧ необходимо знать относительность работы трения превращающейся в тепло.

Если в тепло превращается 99,5 % работы трения, то коэффициент КПЧ оценивается величиной  $\xi = 5 \cdot 10^{-3}$ .

**5.3. по третьему способу** порядок величины КПЧ имеет значение  $\xi = 10^{-8}$ .

При этом требуется знать удельную работу трения сопряжения  $A_{FV}$  и предельное значение удельной работы или твёрдость.

**5.4. Главная научная** ценность предложенных способов определения коэффициента повреждающей части работы трения является мировоззренческой и состоит : в установлении соотношения величин энергетических потоков при трении поверхности трибологических систем обоснованные порядки оценок поврежденной части работы трения позволяет строить более достоверные энергетические модели изнашивания.

**5.5. при наличии КПЧ представляется возможным определять как объёмный** так и размерный износ поверхностей в зависимости от нагрузки коэффициента трения, пути трения и твёрдости.

**5.6.** В частности *получено теоретически, что износ обратно пропорционален твёрдости*, что является предельной удельной работой трения.

**Литература**

1. Кузьменко А.Г. Энергетические методы и модели в трибологии. Часть II. Поглощение энергии и повреждаемость поверхности в контакте // Проблемы трибологии. – 2005. – №3. – С. 41-91.
2. Ящерицын П.И., Еременко М.Л., Фельдштейн Е.Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах. – Минск: Высшая школа, 1990. – 512 с.
3. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Э.Д. Браун, Н.А. Буше, И.А. Буяновский и др. / Под ред. А.В. Чичинадзе: Учебник для технических ВУЗов. – М.: Центр «Наука и техника», 1995. – 778 с.

- 
4. Исаков Д.И., Щетинкин В.А. Критерии оценки трибологических свойств смазочных материалов // Проблемы трибологии. – 1991. – № 2. – С. 20-21.
  5. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. – М.: Наука, 1967. – 608 с.

Поступила в редакцию 14.05.2013

**Kuzmenko A.G. Methods of estimation of size, coefficient of part of work of friction, defiant the wear of surface.**

A scientific value of the offered methods of determination of coefficient of damaging part of work of friction is a world view and consists of correlating sizes of power streams at the friction of surface of the tribology systems. Allows to build the grounded orders of estimations of the damaged part of work of friction more reliable power models of wear. It is got in theory, that a wear is back proportional hardness, that is maximum specific work of friction.

**Keywords:** coefficient of friction, wear, maximum energy, hardness.

### References

1. Kuz'menko A.G. Jenergeticheskie metody i modeli v tribologii. Chast' II. Poglashhenie energii i povrezhdaemost' poverhnosti v kontakte. Problemy tribologii. 2005. No 3. pp. 41-91.
2. Jashhericyn P.I., Eremenko M.L. Fel'dshtejn E.Je. Teorija rezanija. Fizicheskie i teplovyje processy v tehnologicheskix sistemah. Minsk, Vysshaja shkola, 1990. 512 p.
3. Chichinadze A.V. Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka), Uchebnik dlja tehniceskix VUZov. M. Centr «Nauka i tehnika», 1995. 778 p.
4. Isakov D.I., Shhetinkin V.A. Kriterii ocenki tribologicheskix svojstv smazochnyh materialov. Problemy tribologii. 1991. No 2. pp. 20-21.
5. Bronshtejn I.N., Semendjaev K.A. Spravochnik po matematike. M. Nauka, 1967. 608 p.