

**Диха О.В.,  
Сорокати Р.В.,  
Гедзюк Т.В.**

Хмельницький національний університет,  
м. Хмельницький, Україна

## ВПЛИВ ШВИДКІСНОГО ФАКТОРА НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТРИБОСИСТЕМ ГРАНИЧНОГО ТЕРТЯ

### Вступ

Процеси тертя та зношування машин багато в чому залежать від властивостей мастильного матеріалу. Останніми роками західні і вітчизняні фірми приділяють велику увагу розробці високоякісних мастильних матеріалів, як на синтетичній так і на мінеральній основі, здатних задовольняти підвищеним вимогам до антифрикційних, протизносових та антизадирих властивостей.

Вибір мастильного матеріалу залежить від конструктивно-технологічних особливостей вузла тертя, зокрема матеріалів, що використовуються для виготовлення або відновлення поверхонь вузлів тертя, їх подальшої обробки, режиму роботи мастильного матеріалу і умов його експлуатації.

Тип мастила уточнюється лабораторними і стендовими випробуваннями. В даний час підбір мастил до агрегатів машин є складним завданням, з огляду на те, що на споживчому ринку є великий асортимент мастильних матеріалів різних фірм - виробників, дані про які не дозволяють судити про їх дійсну якість.

Для ефективного вибору мастильного матеріалу необхідно дослідити основні закономірності процесів тертя і зношування деталей машин, умови, в яких експлуатуються мастила, режими навантаження, швидкісні характеристики.

### Постановка завдання

Вплив швидкості ковзання на фрикційні властивості вивчений недостатньо. Швидкість ковзання визначає тривалість існування одиничного фрикційного зв'язку і, відповідно, швидкість деформування матеріалів. З цієї причини на тертя та зношування впливає в'язкість фрикційного контакту. Якщо має місце безпосередній контакт нерівностей (граничне тертя і мащення), зростання швидкості ковзання призводить до скорочення тривалості фрикційного контакту, зменшення площі фактичного торкання і зменшення коефіцієнту тертя. Більшість пар тертя, що працюють в умовах граничного змащування, мають чітко визначені реологічні властивості і сприяють виникненню релаксаційних коливань, що характеризуються спадаючою залежністю сили тертя від швидкості. В умовах рідинного тертя, коли немає взаємного проникнення матеріалів, реалізується звичайна в'язкість мастила, яка призводить до зростання опору при зростанні швидкості. Тобто в даному випадку впливають реологічні властивості мастильного матеріалу [1-2]. В даній роботі ставиться задача на основі лабораторних випробувань на зношування дослідити вплив швидкості ковзання зразків на характеристики зношування в умовах граничного змащування.

### Виклад основного матеріалу

#### 1. Теоретичні передумови

Для опису процесу зношування, в тому числі і за наявності мастильного матеріалу, використовують математичні форми закономірностей зношування. Закономірність зношування встановлюється експериментально та апроксимується деякими функціями. Найбільшого розповсюдження отримало подання експериментальних закономірностей у вигляді залежності інтенсивності зношування від різних параметрів (контактного тиску, швидкості ковзання, температури). Для прогнозування зношування в присутності мастильного матеріалу пропонується використовувати модель [3] у вигляді залежності

інтенсивності зношування від параметрів: навантаження  $W = \frac{\sigma}{E^*}$  і швидкості ковзання  $U = \frac{V \cdot R^*}{v}$ .

$$\frac{du_w}{ds} = K_w W^m U^n, \quad (1)$$

де  $\sigma$  – тиск в контактї, МПа;

$E^*$  – приведений модуль пружності матеріалів контактуючих тіл, МПа;

$V$  – швидкість ковзання, м/с;

$R^*$  – приведений радіус контактуючих тіл, м;

$v$  – кінематична в'язкість мастильного матеріалу (при 100 °С), м<sup>2</sup>/с;

$u_w$  – лінійний знос тіл, м;

$S$  – шлях тертя для тіла, що зношується, м;

$K_w, m, n$  – параметри закономірності зношування.

Розрахункова схема випробувань показана на рис. 1.

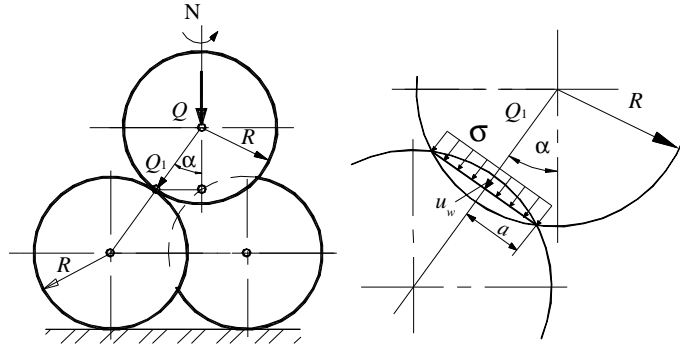


Рис. 1 – Геометрія контакту при випробуваннях за чотирикульковою схемою

Прийнявши припущення про рівномірний розподіл контактної тиску, маємо:

$$\sigma = \frac{Q_1}{\pi a^2}, \quad (2)$$

де  $Q_1$  – сила, що діє по нормалі до кожної нижньої кульки;

$a$  – радіус кругової площадки контакту спряжених кульок.

Сила  $Q_1$  виражається через загальну силу  $Q$ , що діє на верхню кульку:  $Q_1 = 0,4082Q$ . Зв'язок зносу  $u_w$  і розміру площадки контакту  $a$  нижніх кульок в центрі площадки контакту визначається з геометрії перетину сферичних поверхонь в залежності від радіусу площадки контакту  $a$  і шляху тертя:

$$u_w(S) = \frac{a(S)^2}{2R}. \quad (3)$$

Експериментальна залежність радіусу кругової площадки контакту від шляху тертя представляється у вигляді степеневі апроксимації:

$$a(S) = cS^\beta, \quad (4)$$

де  $c, \beta$  – параметри апроксимації, які визначаються за наслідками випробувань на чотирикульковій машині тертя.

Інтегруючи вираз (1), отримаємо інтегральну форму моделі зношування нижніх кульок:

$$u_w(S) = K_w \int_0^S W^m(S) U^n dS. \quad (5)$$

Підставляючи в ліву частину рівняння вираз для зносу через радіус площадки контакту, а в праву вираз для контактної тиску, отримаємо:

$$\frac{a^2(S)}{2R} = K_w \int_0^S \left[ \left( \frac{Q_1}{\pi a^2(S)} \right) \frac{1}{E^*} \right]^m \left( \frac{VR^*}{v} \right)^n dS, \quad (6)$$

або після інтегрування по шляху тертя маємо:

$$\frac{c^2 S^{2\beta}}{2R} = K_w \left( \frac{Q_1}{c^2 \pi E^*} \right)^m \left( \frac{VR^*}{v} \right)^n \frac{S^{1-2\beta m}}{1-2\beta m}. \quad (7)$$

Звідки:

$$m = \frac{1-2\beta}{2\beta}. \quad (8)$$

Для знаходження параметра  $n$  проводимо випробування на чотирикульковій машині тертя при двох значеннях швидкості, звідки отримаємо дві групи даних з параметрами:

$$a = c_1 S^\beta; \quad a = c_2 S^\beta. \quad (9)$$

В даній роботі розглядаються задачі визначення параметрів зношування за наслідками випробувань зразків з площадкою контакту  $a(S)$ , що змінюється в процесі зношування. Зміна площадки зношування викликає зміну значень контактної тиску  $\sigma(a)$ . Показник степеня  $m$  характеризує швидкість зміни контактних тисків і безпосередньо пов'язаний з параметром  $\beta$  експериментальної залежності (4), який характеризує відповідно швидкість зміни площадки контакту при зношуванні. Зв'язок між  $m$  і  $\beta$  в прийнятій закономірності зношування однозначно описується співвідношенням (8). Оскільки в даних виразах швидкість ковзання  $V$  не залежить від шляху тертя  $S$ , то вона не впливає на параметри  $m$  і  $\beta$  в процесі проведення випробувань. В даному випадку зміна швидкості ковзання  $V$  лінійно впливає тільки на масштабний коефіцієнт  $c$ . Викладені міркування підтверджуються результатами випробувань.

Вирази (9) дозволяють отримати на базі рівняння (7) систему двох рівнянь для відшукування шуканих параметрів. В результаті отримаємо:

$$n = (2m + 2) \frac{\lg(c_1/c_2)}{\lg(V_1/V_2)}; \quad K_w = \frac{\beta c_1^{2m+2}}{R} \left( \frac{\pi E^*}{Q_1} \right)^m \left( \frac{v}{V_1 R^*} \right)^n. \quad (10)$$

## 2. Результати випробувань

Для дослідження впливу швидкості ковзання були досліджені два типи мастильних матеріалів:

1. М6/12 – Г1,  $v = 12 \text{ мм}^2/\text{с}$ ;
2. 15W-40,  $v = 15 \text{ мм}^2/\text{с}$ .

Випробування проводились на чотирикульковій машині тертя за наступних умов:

1. Діаметри верхніх и нижніх кульок 12,7 мм.
2. Навантаження на верхню кульку 65 Н;

3. Частоти обертання верхньої кульки  $N_1 = 200 \text{ об/хв}$ ,  $N_2 = 500 \text{ об/хв}$  (лінійні швидкості ковзання відповідно –  $V_1 = 0,077 \text{ м/с}$ ,  $V_2 = 0,192 \text{ м/с}$ ).

Під час випробувань температура масла в зоні контакту контролювалася за допомогою термометра ЕТП-1М. За даних умов випробувань температура масла залишалася майже незмінною  $\sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Результати випробувань представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Середні розміри радіусів зносу  $a$  нижніх куль, в мм

Тип мастила	20 хв	40 хв	60 хв	90 хв	120 хв
$n = 200 \text{ об/хв}$					
М6-12Г	0,55	0,73	0,79	0,80	0,80
$n = 500 \text{ об/хв}$					
М6-12Г	0,61	0,80	0,80	0,81	0,82
$n = 200 \text{ об/хв}$					
15W-40	0,50	0,65	0,66	0,69	0,71
$n = 500 \text{ об/хв}$					
15W-40	0,57	0,70	0,73	0,77	0,80

Графічна інтерпретація результатів випробувань показана на рис. 2.

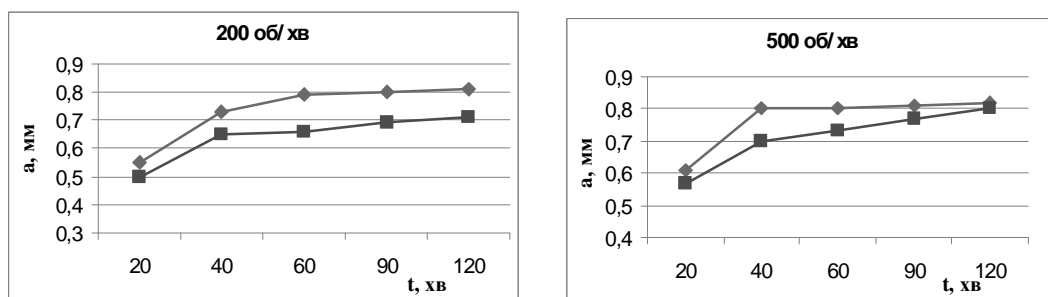


Рис. 2 – Залежності розміру площадки зносу від часу (♦ – М6-12Г; ■ – 15W-40)

Параметри зносостійкості за алгоритмом залежностей (1 - 10) розраховувались за допомогою програми MathCad.

Параметри апроксимації експериментальної функції (4) визначались за допомогою програми Excel.

Приклад реалізації розрахунку для першого типу масла М6-12Г наведений нижче.

**Розрахунки параметрів зношування при випробуваннях за чотирикульковою схемою**

1 - Від даних  
2 - Визначення параметрів с та β  
3 - Побудова закону зношування

Данні Швидкості обертання  $n_1 := 200 \text{ об}^{-1}$   $n_2 := 500 \text{ об}^{-1}$   
 Радіус кульок  $R' := 6.35 \text{ мм}$   
 Швидкість ковзання  $V_1 := 77 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$   $V_2 := 192 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$   
 Сила  $Q_1 := 65 \text{ Н}$   $Q_2 := 0.4082 Q_1$   
 Кінематична вязкість  $\nu := 12 \frac{\text{мм}^2}{\text{с}}$   
 Модуль пружності  $E := 2.1 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$   $E_1 := E$   $E_2 := E_1$   
 $\alpha := 0.3$

$$\beta_1 := 0.2788 \quad \beta_2 := 0.2655 \quad \beta := \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} = 0.272$$

$$c_1 := 0.0367 \text{ мм}^{1-\beta} \quad c_2 := 0.0347 \text{ мм}^{1-\beta}$$

$$m' := \frac{1 - 2\beta}{\beta} = 1.674$$

$$n := (2m' + 2) \frac{\log\left(\frac{c_1}{c_2}\right)}{\log\left(\frac{V_1}{V_2}\right)} = -0.328$$

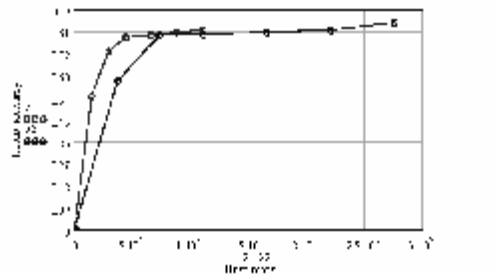
$$K_w := \frac{\beta \cdot c_1^{2m'+2}}{R'} \left(\frac{\pi E'}{Q_1}\right)^{m'} \left(\frac{\nu}{V_1 R'}\right)^n = 0.026$$

Отримані результати дослідження

$t_0 = 0$	$t_1 = 20$	$t_2 = 40$	$t_3 = 60$	$t_4 = 90$	$t_5 = 120$	$t_6 = 150$
$a_{10} = 0.01$	$a_{11} = 0.55$	$a_{12} = 0.73$	$a_{13} = 0.79$	$a_{14} = 0.80$	$a_{15} = 0.81$	$a_{16} = 0.82$
$a_{20} = 0.01$	$a_{21} = 0.61$	$a_{22} = 0.80$	$a_{23} = 0.80$	$a_{24} = 0.81$	$a_{25} = 0.82$	$a_{26} = 0.85$

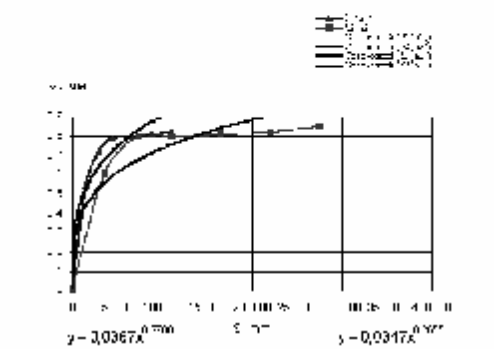
$$S_1 = 0.5774 R' n_1 t \quad S_2 = 0.5774 R' n_2 t$$

$\begin{pmatrix} 0 \\ 1.467 \cdot 10^4 \\ \dots \\ 4.4 \cdot 10^4 \\ \dots \\ 1.1 \cdot 10^5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 3.666 \cdot 10^4 \\ \dots \\ 1.1 \cdot 10^5 \\ \dots \\ 2.2 \cdot 10^5 \end{pmatrix}$
---	---



Параметри апроксимації:  $K = 0.026$ ,  $\beta = 0.272$ ,  $m' = 1.674$ ,  $n = -0.328$

$t_0$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$
0	20	40	60	90	120	150
0.01	0.55	0.73	0.79	0.80	0.81	0.82
0.01	0.61	0.80	0.80	0.81	0.82	0.85

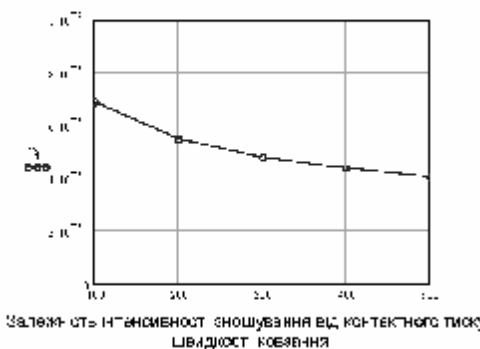
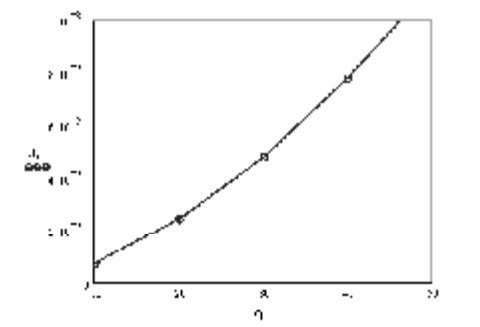


**Розрахунок параметрів зносостійкості**

$$\sigma_i = \frac{V_i}{V_1} \quad \sigma_i = \frac{\sum V_i}{\sum V_1} = \frac{300}{5} = 60$$

$$K_w = \frac{\beta \cdot c_1^{2m'+2}}{R'} \left(\frac{\pi E'}{Q_1}\right)^{m'} \left(\frac{\nu}{V_1 R'}\right)^n$$

$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$	$\sigma_5$	$\sigma_6$
10	20	30	40	50	60



Залежність інтенсивності зношування від контактної тиску і швидкості ковзання

Після реалізації розрахункового алгоритму були отримані необхідні параметри апроксимуючої функції (4) і параметри функції інтенсивності зношування (1), представлені в табл. 2.

## Результати розрахунку параметрів зносостійкості

Тип масла	M6-12Г	15W-40
$\beta$	0,272	0,266
$c_1, \text{мм}^{1-\beta}$ (200 об/хв)	0,0367	0,0353
$c_2, \text{мм}^{1-\beta}$ (500 об/хв)	0,0347	0,0339
$m$	1,674	1,759
$n$	-0,328	-0,232
$K_w$	0,026	0,018

Значення отриманих параметрів в безрозмірному комплексі інтенсивності зношування (1) дають можливість кількісно оцінити вплив факторів контактного тиску та швидкості ковзання на знос.

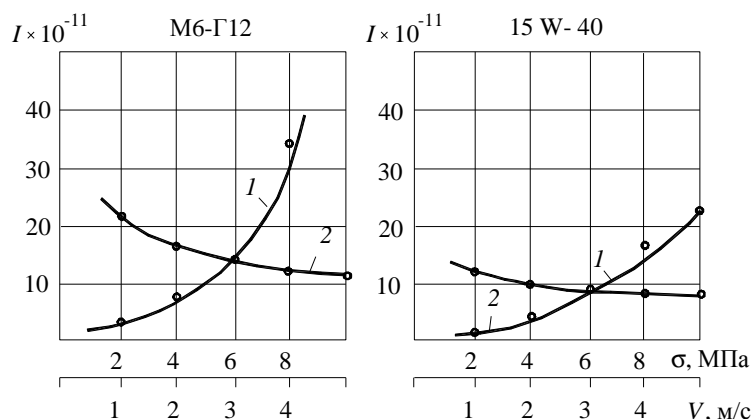


Рис. 3 – Залежності інтенсивності зношування  $I$  від контактного тиску  $\sigma$  (1) та швидкості ковзання  $V$  (2)

На рис 3. представлені графічні залежності інтенсивності зношування від контактного тиску і швидкості ковзання, побудовані на основі прийнятої моделі зношування (1) з параметрами, отриманими і розрахованими в результаті проведених випробувань двох типів мастильних матеріалів при двох значеннях швидкості ковзання. Отримані параметри моделей зношування дозволяють визначати значення інтенсивності зношування вузлів тертя, що працюють з вказаними мастильними матеріалами для різних умов навантаження та швидкостей ковзання. Загальний аналіз отриманих результатів однозначно вказують на підвищення зносостійкості із збільшенням швидкості ковзання в робочому діапазоні параметрів, в яких проводились випробування для обох типів мастильних матеріалів. Ці результати узгоджуються з основними загально прийнятими положеннями впливу швидкості ковзання на процеси тертя і зношування, характерними для граничного режиму змащування, який реалізується при випробуваннях за чотирикульковою схемою. Представлена розрахунково-експериментальна методика дозволяє на основі традиційних випробувань отримувати кількісні моделі зношування, що дозволяють прогнозувати зносостійкість вузлів тертя в умовах граничного змащування і оптимізувати конструктивні, кінематичні та навантажувальні параметри змащених трибосистем.

### Висновок

Представлена експериментально-розрахункова методика дослідження впливу швидкості ковзання на зносостійкість вузлів тертя за результатами лабораторних випробувань за чотирикульковою схемою в умовах граничного змащування.

### Література

1. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М.: Машгиз, 1962. – 383 с.
2. Справочник по триботехнике / под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе : в 3 т. – Т. 1. Теоретические основы. – М. : Машиностроение, 1989. – 400 с.
3. Кузьменко А. Г Контакт, трение и износ смазанных поверхностей. Монография / А.Г.Кузьменко, А.В. Дыха. – Хмельницкий: ХНУ, 2007. – 344 с.

Надійшла 09.01.2011