

**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 антизадирних 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 характеризується 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 σ – тиск в контакті, 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), м²/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.

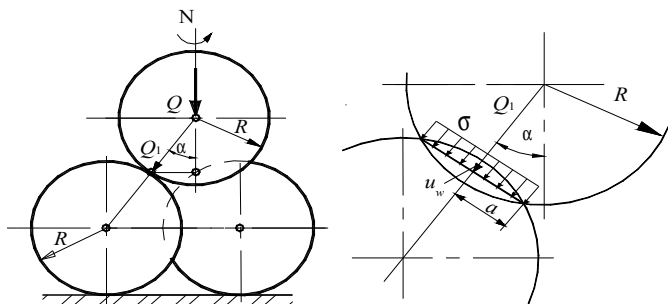


Рис. 1 – Геометрія контакту при випробуваннях за чотирикульковою схемою

Прийнявши припущення про рівномірний розподіл контактного 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, β – 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 контактного 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 контактного тиску $\sigma(a)$. Показник степеня m характеризує швидкість зміни контактних тисків і безпосередньо пов'язаний з параметром β експериментальної залежності (4), який характеризує відповідно швидкість зміни площадки контакту при зношуванні. Зв'язок між m і β 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 β 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 і 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.

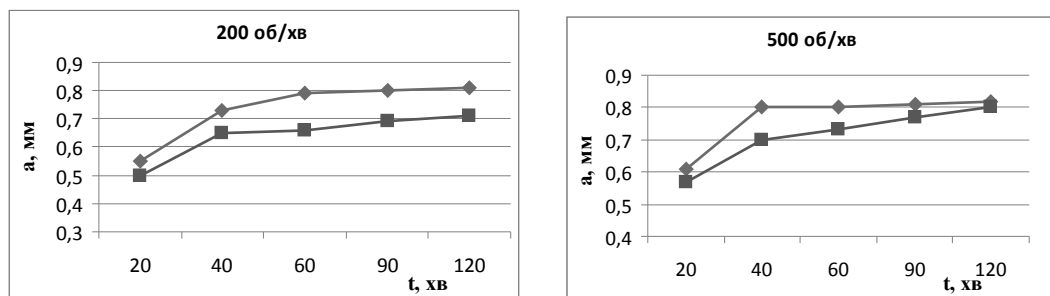


Рис. 2 – Залежності розміру площадки зносу від часу (♦ – М6-12Г; ■ – 15W-40)

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

Данні	Швидкості обертання	$n_1 := 200 \text{ хв}^{-1}$	$n_2 := 500 \text{ хв}^{-1}$
	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	$Q := 65 \text{ Н}$	$Q_1 := 0.4082Q$
	Кінематична вязкість	$\nu := 12 \frac{\text{мм}^2}{\text{с}}$	
	Модуль пружності	$E := 2.1 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$	$E_1 = E \quad E_2 = E_1$
		$\alpha := 0.3$	

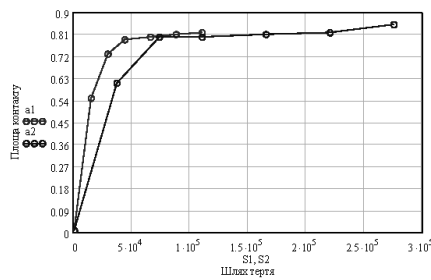
Отримані результати дослідження

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

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

$S_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1.467 \cdot 10^4 \\ 2.933 \cdot 10^4 \\ 4.4 \cdot 10^4 \\ 6.6 \cdot 10^4 \\ 8.8 \cdot 10^4 \\ 1.1 \cdot 10^5 \end{pmatrix}$	$S_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 3.666 \cdot 10^4 \\ 7.333 \cdot 10^4 \\ 1.1 \cdot 10^5 \\ 1.65 \cdot 10^5 \\ 2.2 \cdot 10^5 \\ 2.75 \cdot 10^5 \end{pmatrix}$
---	---

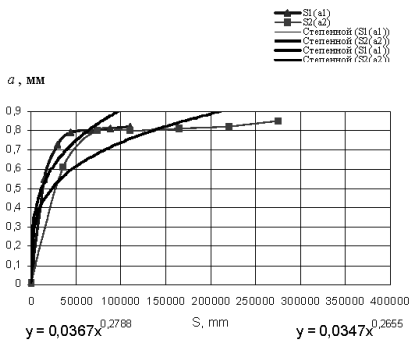
Графік залежності площі контакту від шляху тертя



Приведений радіус $R' = 6.35 \text{ мм}$
 Приведений модуль пружності $E' = \frac{E}{2(1-\alpha^2)} = 1.154 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$

Знаходження коефіцієнтів с та β у програмі Excel

S_1	a_1	S_2	a_2
0.01	0.01	0.01	0.01
15000	0.55	36000	0.61
29000	0.73	73000	0.8
44000	0.79	110000	0.8
66000	0.8	165000	0.81
88000	0.81	220000	0.82
110000	0.82	275000	0.85



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

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

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

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

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

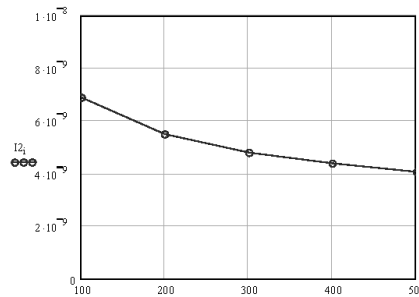
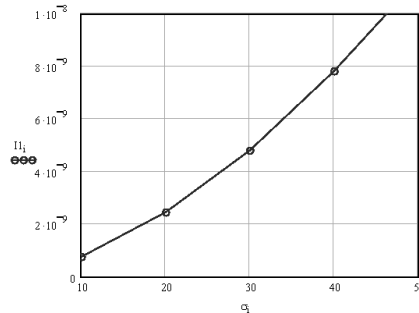
$i := 0.4$

Розрахунок параметрів зносостійкості

$\sigma_i = \begin{pmatrix} 10 \\ 20 \\ 30 \\ 40 \\ 50 \end{pmatrix}$	$V_i = \begin{pmatrix} 100 \\ 200 \\ 300 \\ 400 \\ 500 \end{pmatrix}$	$V_{sr} := \frac{\sum V_i}{5} = 300$	$\sigma_{sr} := \frac{\sum \sigma_i}{5} = 30$
---	---	--------------------------------------	---

$I_1 := Kw \left(\frac{\sigma_i}{E'} \right)^{m'} \left(\frac{V_{sr} R'}{\nu} \right)^n$ $I_2 := Kw \left(\frac{\sigma_{sr}}{E'} \right)^{m'} \left(\frac{V_i R'}{\nu} \right)^n$

$I_1 = \begin{pmatrix} 10 \cdot 10^{-9} \\ 2 \cdot 10^{-9} \\ 5 \cdot 10^{-9} \\ 5 \cdot 10^{-9} \\ 5 \cdot 10^{-9} \end{pmatrix}$	$I_2 = \begin{pmatrix} 4 \cdot 10^{-9} \\ 5 \cdot 10^{-9} \\ 5 \cdot 10^{-9} \\ 1 \cdot 10^{-9} \\ 2 \cdot 10^{-9} \end{pmatrix}$
--	---



Залежність інтенсивності зношування від контактного 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
β	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.

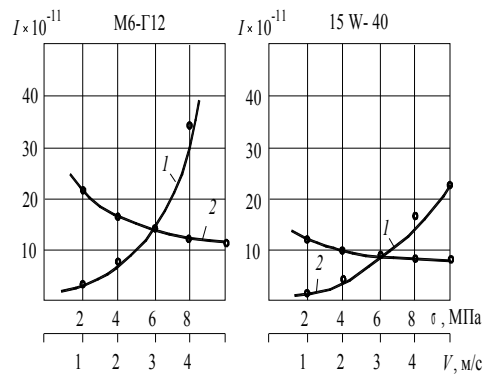


Рис. 3 – Залежності інтенсивності зношування I від контактного тиску σ (1) та швидкості ковзання V (2)

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 загальноприйнятими 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. – Хмельницький: ХНУ, 2007. – 344 с.

Надійшла 09.01.2011