

Romuald MAKOWSKI*

ZUŻYCIE JAKO KRYTERIUM OCENY WPLYWU ŚRODKA SMAROWEGO W SYSTEMIE TRIBOLOGICZNYM

WEAR AS THE CRITERION OF EVALUATION OF LUBRICANT INFLUENCE ON A TRIBOLOGICAL SYSTEM

Słowa kluczowe:

tarcie, tarcie ślizgowe, współczynnik tarcia, smarowanie, substancja smarująca, cząstki metalu, zużycie

Key-words:

friction, sliding friction, friction coefficient, lubrication, lubricating medium, metal particles, wear

Streszczenie

Autor przedstawia metodę i wyniki badań dotyczących wartości pomiaru zużycia elementu pary kinematycznej jako kryterium oceny wpływu środka smarowego w systemie tribologicznym.

WSTĘP I UZASADNIENIE PODJĘCIA BADAŃ

Środki smarowe – głównie oleje, pomimo swoich głównych zalet, do których można zaliczyć między innymi: zmniejszanie oporów tarcia i zużycia,

* Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Radomska, ul. Chrobrego 45, 26-600 Radom.

odprowadzanie ciepła i produktów zużycia ze strefy tarcia, tłumienie drgań, ochrona przed korozją nie rozwiązują oczywistych problemów niedosmarowania w warunkach ekstremalnych obciążeń i temperatur oraz likwidacji tzw. zimnego startu, np. zimnego rozruchu silnika (przez pierwsze kilkanaście sekund silnik jest niedosmarowany) [L. 2, 3]. Powstała więc idea wprowadzenia do węzłów tarcia wraz z olejem dodatku uzupełniającego, mogącego łagodzić tego rodzaju warunki. Mechanizm działania tych dodatków (NDS) najogólniej można przedstawić następująco: cząstki NDS transportowane są przez ciecz smarującą do węzłów tarcia, gdzie w wyniku adsorpcji fizycznej lub chemisorpcji wiążą się ze współpracującymi tarciowo metalicznymi powierzchniami. Na powierzchniach tych w procesie tarcia powstaje film smarowy o nowych właściwościach oraz zastępcza warstwa graniczna (ZWG) [L. 1, 4-8]. W przypadku niedosmarowania w miejscach lokalnych styków powierzchni metalicznych, gdy olej bazowy nie zapewnia prawidłowego smarowania, do akcji włączają się cząstki ZWG, które przejmują na siebie rolę filmu olejowego.

Spośród badanych i stosowanych w praktyce eksploatacyjnej rozróżnia się NDS, które można podzielić na trzy zasadnicze grupy:

- A – dodatki o oddziaływaniu chemicznym (typu EP),
- B – dodatki zawierające w swoim składzie określone cząstki stałe środków smarowych, takie jak: teflon, metale miękkie, grafit i inne,
- C – dodatki umożliwiające powstanie w węźle tarcia smarowania na zasadzie tzw. selektywnego przenoszenia.

Problemem dość istotnym jest wyznaczenie parametrów określających przydatność danych środków smarowych w warunkach tribologicznych. W zasadzie wyznacza się charakterystyki tarciove, np. obciążeniową i czasową, które służą do analizy oporów tarcia i procesów zużycia węzła kinematycznego. Autor publikacji, we współpracy z prof. A.G. Kuzmienką z Chmielnickiego Narodowego Uniwersytetu w Chmielnickim na Ukrainie proponuje nową metodę oceny środków smarowych na podstawie wartości zużycia jednego z elementów pary tribologicznej po procesie tarcia.

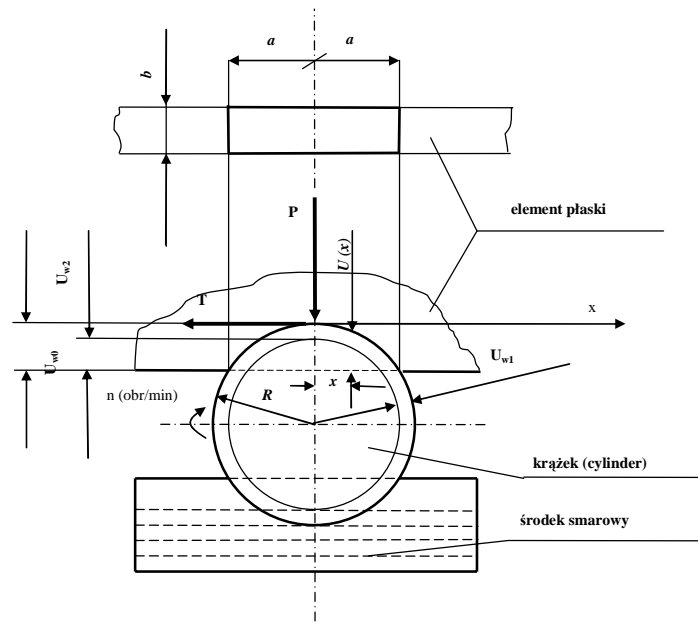
BADANIA TRIBOLOGICZNE

Warunki badań

Stanowisko badawcze: badania tribologiczne prowadzono za pomocą maszyny tarciovej T05, której opis techniczny znajduje się w literaturze [L. 12].

Materiały badawcze: materiał próbki (płaskiej) – stal 45 wg PN/H-84019, obrobiona cieplnie do ok. HRC 45-50, przeciwpróbki (krążki) – stal NC6 wg PN/H-85023, obrobiona cieplnie do ok. HRC 62. Powierzchnie robocze próbki i przeciwpróbki szlifowane do $R_a \sim 0,6 \mu\text{m}$.

Środki smarowe: olej podstawowy (bazowy): SAE 10/95, którego lepkość kinematyczna przy temperaturze $t = 100^\circ\text{C}$ wynosi $\nu = 5,2 \div 5,9 \text{ mm}^2/\text{s}$ i SAE 30/95, o $\nu = 9,6 \div 12,9 \text{ mm}^2/\text{s}$. Producent olejów – „Grupa LOTOS SA”.



Rys. 1. Schemat węzła tribologicznego maszyny tarciowej T05 oraz pomiaru zużycia elementów tego węzła, P – siła normalna obciążenia zewnętrznego węzła, F – siła tarcia

Fig. 1. Scheme of tribological joint of T05 friction machine and the joint wear measurement, where: P – loading external force, T – friction force

Oznaczenia:

$U_{w1}(S_1, x)$ – zużycie liniowe elementu obrotowego (krążka) mierzone wg normalnej do powierzchni styku z elementem płaskim,

$U_{w2}(S_2, x)$ – zużycie liniowe elementu płaskiego mierzone wg normalnej do powierzchni styku z elementem obrotowym,

S_2 – droga tarcia dla punktów styku krążka,

x – współrzędne punktu styku wg osi „x”,

z – oś wyznaczona jako prostopadła do osi „x”, leżąca na płaszczyźnie prostopadłej do elementu obrotowego,

$u(a, x)$ – funkcja geometryczna ciągłości zużyć współpracujących elementów,

a – połowa szerokości kontaktu elementów po osi „x”.

Cząstki miedzi: produkcji firmy Aldrich o rozmiarach zewnętrznych ok. 3 μm .

Udział wagowy cząstek w oleju podstawowym $U_w = 0,25\%$.

Warunki badań: schematycznie węzeł tribologiczny maszyny tarciowej przedstawiono na **Rysunku 1**. Badania prowadzono przy prędkości obrotowej przeciwpróbki $n = 200$ obr./min, co odpowiada prędkości liniowej poślizgu $V = 0,4$ m/s.

Obciążenie próbki przy wyznaczaniu charakterystyki czasowej $\mu = f(P)$ wynosiło $P = 600$ N, dla dróg tarcia $S = 100, 300, 600$ i 1000 m.

Po badaniach tarciowych poddano analizie zużycie liniowe próbek płaskich.

Schemat pomiaru zużycia przedstawiono na **Rysunku 1**.

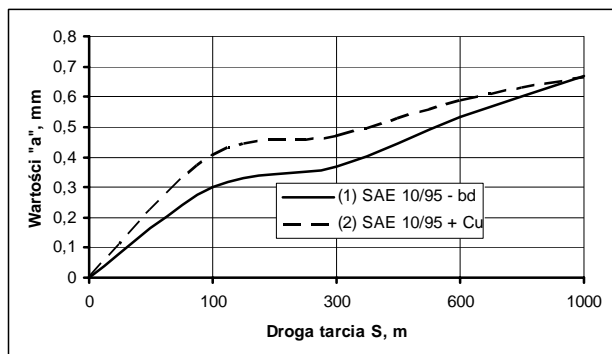
WYNIKI BADAŃ

Wyniki pomiarów parametru „a” wykonane wg **Rys. 1** przedstawiono w **Tabeli 1**.

Tabela 1. Wartości „a” zużycia elementu płaskiego

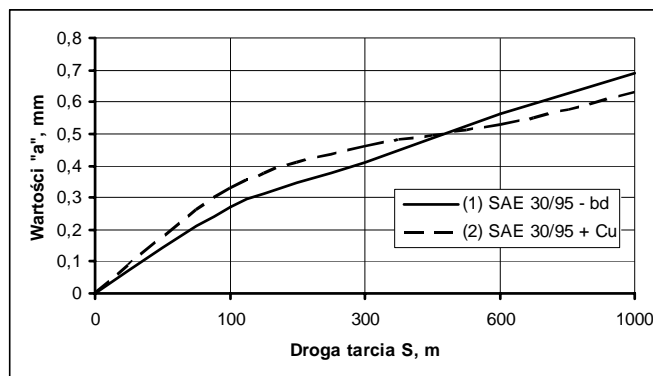
Table 1. Wear values “a” of plain element

Środki smarowe	Droga tarcia S, m			
	100	300	600	1000
	a [mm]	a [mm]	a [mm]	a [mm]
SAE 10/95 - bd	0,28	0,37	0,535	0,62
SAE 10/95 + Cu	0,40	0,47	0,59	0,63
SAE 30/95 - bd	0,27	0,41	0,565	0,65
SAE 30/95 + Cu	0,34	0,46	0,53	0,63



Rys. 2. Zależność parametru „a” od drogi tarcia dla oleju SAE 10/95

Fig. 2. Dependence of “a” parameter on friction distance for oil SAE 10/95



Rys. 3. Zależność parametru „a” od drogi tarcia dla oleju SAE 30/95
 Fig. 3. Dependence of "a" parameter on friction distance for oil SAE 30/95

METODA WYZNACZENIA PARAMETRÓW MODELU ZUŻYCIA

Teoretyczne podstawy metod badawczych na zużycie z obliczaniem (wyznaczaniem) parametrów opracowano w monografii [L. 9, 10], a praktyczne procedury zastosowania tych metod przedstawiono w literaturze [L. 11].

W artykule przedstawiono istotę tej metody w celu praktycznego jej zastosowania do badań tribologicznych prowadzonych według schematu przedstawionego na **Rys. 1**.

Wyprowadzenie obliczeniowych współzależności

Przedstawienie zadania składa się z trzech zapisów funkcyjnych, a mianowicie:

- równanie modelu zużycia:

$$\frac{dU_w}{ds} = k_w \sigma^m \quad (1)$$

- równania równowagi wg średniego nacisku:

$$\sigma = \frac{P}{2ab} \quad (2)$$

- warunku ciągłości w kontakcie:

$$U_w = \frac{a^2}{2R} \quad (3)$$

Zadanie polega na obliczeniu parametrów k_w, m przy znanej zależności $a(s)$, tzn. połowy szerokości płaszczyzny zużycia od drogi tarcia s :

$$a = a(s) \quad (4)$$

Podstawiając (2) do (1) i całkując, otrzymujemy:

$$U_w = k_w \int \left(\frac{P}{2ab} \right)^m ds \quad (5)$$

lub z uwzględnieniem (3):

$$\frac{a^2}{2Rk_w} = \left(\frac{P}{2b} \right)^m \int \frac{ds}{a^m} \quad (6)$$

Doświadczalną zależność $a(s)$ przedstawimy w postaci aproksymacji wykładniczej:

$$a(s) = cs^\beta \quad (7)$$

gdzie c, β – mogą być obliczane według danych eksperymentalnych za pomocą metody najmniejszych kwadratów lub przybliżając do dwóch punktów:

$$(a_1, s_1); (a_2, s_2) \quad (8)$$

$$\beta = \frac{\lg\left(\frac{a_1}{a_2}\right)}{\lg\left(\frac{s_1}{s_2}\right)} \quad (9)$$

$$c = \frac{a_1}{s_1^\beta} \quad (10)$$

Podstawiając (7) do (6) i całkując, otrzymujemy równanie:

$$\frac{c^2 s^{2\beta}}{2Rk_w} = \left(\frac{P}{2b} \right)^m \int \frac{ds}{c^m s^{m\beta}} \quad (11)$$

lub

$$\frac{c^{2+m}(1-m\beta)}{2Rk_w\left(\frac{P}{2b}\right)^m} s^{2\beta} = s^{1-m\beta} \quad (12)$$

Z warunku wykonalności równania (12) przy dowolnych wartościach drogi tarcia s następuje rozwiązanie dla wielkości m :

$$2\beta = 1 - m\beta \quad (13)$$

$$m = \frac{1 - 2\beta}{\beta} \quad (14)$$

Z udziałem wyniku z wyrażenia (12) otrzymujemy:

$$k_w = \frac{c^{2+m} \cdot \beta}{R\left(\frac{P}{2b}\right)^m} \quad (15)$$

Porządek przeprowadzenia badań i obliczenia parametrów modelu zużycia

Metoda obliczenia parametrów składa się z następujących etapów:

1. Prowadzi się badania na zużycie wg schematu przedstawionego na **Rysunku 1**. Dokonuje się pomiarów przekroju płaszczyzny kontaktowej: l – długość po tworzącej; a – połowy szerokości płaszczyzny kontaktowej w kierunku obrotów.
2. Wyniki pomiarów umieszcza się w tablicy lub wykonuje się wykresy. W przypadku dużego rozrzutu punktów graficzne zależności wyprostowuje się wizualnie albo obrabia się metodą najmniejszych kwadratów.
3. Na wykresach zależności wybiera się dwa charakterystyczne punkty typu (8); dalej wg zależności (9) i (10) oblicza się parametry β , c krzywej aproksymacyjnej.
4. Parametry m , k_w modelu zużycia oblicza się wg zależności (14) i (15).

Przykład obliczenia parametrów modelu zużycia

1. W charakterze przykładu weźmiemy dane, otrzymane podczas badań wg schematu (**Rys. 1**) z udziałem środka smarowego SAE 10/95 bez dodatku proszku Cu – **Tabela 1, Rys. 2**.

2. Na krzywej wybieramy dwa punkty bazowe o współrzędnych:

$$a_1 = 0,28 \text{ mm}; s_1 = 100 \text{ m} = 1 \cdot 10^5 \text{ mm}$$

$$a_2 = 0,62 \text{ mm}; s_2 = 1000 \text{ m} = 1 \cdot 10^6 \text{ mm}$$

3. Obliczamy parametry aproksymowanej krzywej wg zależności (9) i (10):

$$\beta = \frac{\lg \frac{a_1}{a_2}}{\lg \frac{s_1}{s_2}} = \frac{\lg \left(\frac{0,28}{0,62} \right)}{\lg \left(\frac{10^5}{10^6} \right)} = 0,345$$

$$c = \frac{a_1}{s_1^\beta} = \frac{0,28}{(10^5)^{0,345}} = 0,0053$$

4. Parametry m , k_w oblicza się z zależności (14) i (15):

$$m = \frac{1 - 2\beta}{\beta} = \frac{1 - 2 \cdot 0,345}{0,345} = 0,9$$

$$k_w = \frac{c^{2+m} \beta}{R \left(\frac{P}{2b} \right)^m} = \frac{(0,0053)^{2,9} \cdot 0,345}{17,5 \left(\frac{600}{18} \right)^{0,9}} = 0,168 \cdot 10^{-7}$$

Wyniki obliczeń parametrów modelu zużycia dla różnych wariantów smarowania przedstawiono w **Tabeli 2**.

Tabela 2. Wyniki obliczeń parametrów modelu zużycia dla różnych środków smarowych

Table 2. Calculations results of wear model parameters for different lubricants

	Środek smarowy	a ₁ a ₂ [mm]	s ₁ s ₂ [mm]	β	c	m	k _w [mm ² /N]
1	SAE 10/95 - bd	0,28	1 · 10 ⁵	0,345	0,0053	0,9	0,168 · 10 ⁻⁷
		0,62	1 · 10 ⁶				
2	SAE 10/95 + Cu	0,40	1 · 10 ⁵	0,2	0,04	3,0	3,16 · 10 ⁻⁹
		0,63	1 · 10 ⁶				
3	SAE 30/95 - bd	0,27	1 · 10 ⁵	0,382	0,0032	0,62	0,3 · 10 ⁻⁷
		0,65	1 · 10 ⁶				
4	SAE 30/95 + Cu	0,34	1 · 10 ⁵	0,27	0,015	1,7	3,56 · 10 ⁻⁹
		0,63	1 · 10 ⁶				

Przykład: porównamy intensywność zużycia podczas smarowania olejem **SAE 10/95** z dodatkiem proszku Cu i bez dodatku wg zależności:

$$I = \frac{dU_w}{ds} k_w \sigma^m \quad (16)$$

Przyjmujemy dla porównania $\sigma = 50 \text{ N/mm}^2$, wtedy:

$$\frac{I(+Cu)_2}{I(bd)_1} = \frac{k_{w_2}}{k_{w_1}} \cdot \frac{\sigma^{m_2}}{\sigma^{m_1}} = \frac{3,16 \cdot 10^{-9} \cdot 50^3}{0,168 \cdot 10^{-7} \cdot 50^{0,9}} = 0,55$$

W analogiczny sposób porównujemy intensywność zużycia dla oleju **SAE 30/95** z dodatkiem i bez dodatku Cu:

$$\frac{I(+Cu)_4}{I(bd)_3} = \frac{k_{w_4}}{k_{w_3}} \cdot \frac{\sigma^{m_4}}{\sigma^{m_3}} = \frac{3,56 \cdot 10^{-9} \cdot 50^{1,7}}{0,3 \cdot 10^{-7} \cdot 50^{0,62}} = 0,67$$

W taki sposób, w danych (konkretnych) warunkach wymuszeń zewnętrznych, porównanie intensywności zużycia według przyjętej metody pokazuje, że zastosowanie proszku miedzi w przypadku oleju SAE 10/95

obniża intensywność zużycia 1,82 razy, a w przypadku oleju SAE 30/95 – 1,49 razy.

WNIOSKI

Na podstawie przedstawionej metody można sformułować następujące wnioski ogólne:

1. Po przeprowadzeniu eksperymentów tribologicznych możemy, na podstawie wyników z badań zużycia, dokonać analizy wpływu dodatków, np. proszku miedzi do różnych środków smarowych na system tribologiczny.
2. Posiadanie modeli i ich parametrów pozwala prognozować zużycie podczas smarowania w różnych warunkach eksploatacji w zależności od obciążenia i czasu pracy węzła kinematycznego.

LITERATURA

1. Laber A., Laber S.: Modyfikowanie warunków pracy węzłów tarcia niekonwencjonalnymi dodatkami niskotarciowymi – mechanizmy działania. Materiały XX Jesiennej Szkoły Tribologicznej, Spała, wrzesień 1995, s. 46–54.
2. Niewczas A., Czerniec M., Ignaciuk P.: Badania trwałości elementów maszyn współpracujących tarcio. IZT Instytut Zastosowań Techniki, Lublin 2000.
3. Praca zbiorowa po redakcją Zwierzyckiego W.: Wybrane zagadnienia zużycia się materiałów w ślizgowych węzłach maszyn. PWN, Warszawa – Poznań 1990.
4. Makowski R., Marczak R. i inni: Dyspersje miedzi i innych metali w materiałach smarnych inicjujące niskotarciowe pokrycia roboczych powierzchni kinematycznych węzłów maszyn. Projekt badawczy Komitetu Badań Naukowych /Nr 7 TO8C 027 08/. Politechnika Radomska, Radom 1998.
5. Sułek M.W., Bocho-Janiszewska A.: Przeciwwzatarciowe oddziaływanie smaru litowego z dodatkami organicznych kompleksów metali. Inżynieria Powierzchni nr 1/2003, s. 59–64.
6. Makowski R.: Ocena wpływu cząstek metali wchodzących w skład środka smarowego na stan warstwy wierzchniej. Tribologia, 4/2001 (178), s. 669– 677.
7. Маковски Р.: Влияние смазочного средства содержащего в своём составе частички металлов на формирование эксплуатационного верхнего слоя. The international scientific journal „Problems of Tribology” nr 1/2004, Ukraina, s. 14–17.

8. Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M.: Wpływ rodzaju twardych cienkich powłok na charakterystyki tribologiczne modelowych węzłów tarcia. Tribologia, 5/2004.
9. Кузьменко А.Г.: Глобальный и локальный коэффициенты трения и объяснение их зависимости от давления// – Проблемы трибологии. – 2008. – №2. – с. 69–97.
10. Кузьменко А.Г.: Прикладная теория методов испытаний на износ. – Хмельницкий: ХНУ, 2008. – 579с.
11. Кузьменко А.Г.: Методи розрахунків і випробувань на зношування та надійність. – Хмельницький: ХНУ, 2002. – 151с.
12. Makowski R.: Modelowy opis zjawisk generowany w systemie tribologicznym obecnością cząstek miękkich metali wprowadzonych do środka smarowego. Projekt badawczy nr 7 T07B 018 29 Ministerstwa Edukacji i Nauki. Politechnika Radomska, Radom 2008.

Recenzent:
Wiesław ZWIERZYCKI

Summary

The author presents the method and the results of investigations concerning wear measurement value of a kinematic couple as the criterion of the evaluation of lubricant influence on a tribological system.