

Aleksander **KOWAL**

OCENA OPORÓW RUCHU TOCZNEGO

Streszczenie: W opracowaniu przeprowadzono analizę związaną z rodzajem potencjalnego ruchu bryły po płaskim podłożu przy zadziałaniu zewnętrznej siły przyłożonej w kierunku poziomym. Przedstawiono także sposób wyznaczania i porównywania współczynników oporu ruchu tocznego dla kuli ze stali łożyskowej obtaczającej się ruchem oscylacyjnym po płaskiej powierzchni próbki z wybranego materiału. Sposób polega na porównaniu energii potencjalnej zadanej wahadłu fizycznemu i energii dyssypowanej w styku kuli i próbki (praca na pokonanie oporów ruchu tocznego). Podano przykładowe wyniki współczynników oporu ruchu tocznego w środowisku zastosowanych środków smarnych oraz ich porównanie zestawiono w tablicach.

1. WSTĘP

W szybkobieżnych pojazdach gąsienicowych, a także w samojezdnych maszynach roboczych ciężkich, np. żurawiach jezdnych, do podłączenia wysięgnika z pojazdem stosuje się łożyska wielkogabarytowe. W łożyskach tych i w podobnych węzłach o ruchu tocznym, występuje problem oceny wartości oporu tego ruchu.

Opory ruchu obciążonych elementów, obtaczających się po bieżni i w określonym środowisku pracy wymagają szczegółowego rozpoznania. Niniejsze opracowanie jest związane z pracami prowadzonymi w tym zakresie w OBRUM-ie od wielu lat [7, 9, 13, 19].

Encyklopedia [3] na temat tarcia podaje następującą informację:

Tarcie, tarcie zewnętrzne, zjawisko powstawania oporu hamującego ruch względem siebie dwóch stykających się ciał; jest procesem dyssypacyjnym, tzn. takim, któremu towarzyszy rozpraszanie energii (ogrzewaniu się, elektryzowanie się ciał, ich niszczenie).

Siłę tarcia T między dwoma ciałami charakteryzuje współczynnik tarcia f , określony dla tarcia ślizgowego jako $f_s=T/N$, a dla tarcia tocznego jako stosunek momentu siły tarcia tocznego względem punktu zetknięcia ciał do siły dociskającej; współczynnik tarcia statycznego jest większy niż tarcia kinetycznego, gdyż opór przy wprawianiu w ruch jest z reguły większy od oporu występującego w trakcie trwania ruchu, zaś współczynnik tarcia płynnego jest o wiele mniejszy niż tarcia suchego.

Ogólnie, tzw. czyste toczenie dotyczy powierzchni lub linii obtaczającej się bez poślizgu po powierzchni wypukłej lub na linii od strony wypukłej.

W obiektach rzeczywistych ma się do czynienia z elementami układu, które posiadają masę i są obciążone siłami zewnętrznymi. Z tego powodu, w styku dwóch elementów występuje nacisk wywołujący odkształcenia, przy określonych cechach materiałowych współpracującej pary [4, 6, 11]. Odkształcenia te przy ruchu tocznym powodują powstawanie poślizgów w styku ciał, a poślizgi kwalifikuje się jako tarcie ślizgowe.

Problem zjawiska oporu ruchu tocznego nie jest dotychczas całkowicie wyjaśniony [14]. Jego analiza pozwala stwierdzić, że głównymi czynnikami wpływającymi na opory tego ruchu są:

- postać geometryczna elementu tocznego i podłoża.
- obciążenia zewnętrzne i jego położenie względem styku.
- cechy mechaniczne materiałów tworzących współpracującą parę oraz warstwa pośrednicząca.
- środowisko pracy, w tym temperatura współpracującej pary ciernej.

2. SPOSÓB WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA OPORU RUCHU TOCZNEGO

Do obliczeń oporów ruchu tocznego przyjmowane są wartości współczynników podawane w literaturze technicznej [2, 5, 15, 18]. Wydaje się, że dla stosowanych par materiałowych przy różnej geometrii styku tych ciał, wartości podawanych współczynników są nazbyt uśrednione. Stąd też, istnieje potrzeba wyznaczenia, a przynajmniej możliwość porównywania wartości współczynników oporu ruchu tocznego dla różnych par materiałowych.

Do tego celu wykorzystano urządzenie [10, 12] w postaci wahadła fizycznego, pokazanego na rysunku 1.



Rys.1. Stanowisko do wyznaczenia współczynnika tarcia tocznego

Rozważmy sytuację, że: do układu wahadła, (kula ze stali łożyskowej obtaczająca się ruchem oscylacyjnym na podłożu płaskim, które w postaci próbek wykonano z różnych materiałów), dostarczono energię potencjalną E_p przez wychylenie, uzyskując określoną wysokość podnoszenia h środka ciężkości masy wahadła.

Wartość energii potencjalnej wynosi

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (1)$$

gdzie: m – całkowita masa wahadła,
 g – przyspieszenie ziemskie,
 h – wysokość podnoszenia.

Po wprowadzeniu wahadła w ruch, energia potencjalna zamieniana jest w pracę przy pokonywaniu oporów oscylacyjnego ruchu kuli po powierzchni próbki płaskiej. Pracę tę do chwili zatrzymania się wahadła można wyznaczyć z zależności

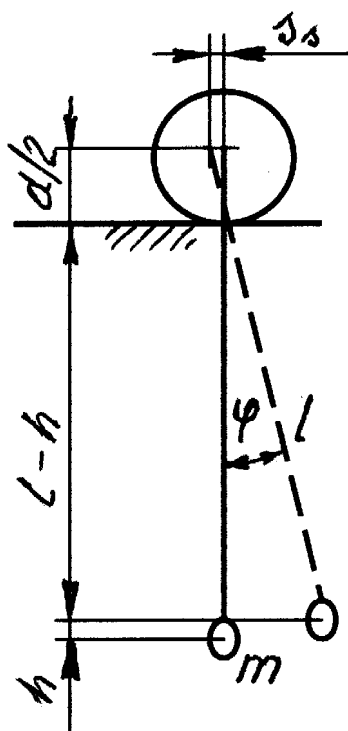
$$L_t = F_t \cdot s_s \cdot i = m \cdot g \cdot \mu_{ow} \cdot S \quad (2)$$

gdzie: F_t – opór ruchu tocznego w styku,
 S – całkowita droga ruchu środka kuli,
 μ_{ow} – współczynnik oporu ruchu tocznego kuli w wahadle,
 i – liczba okresów wahadła,
 s_s – średnia amplituda wahań przebyta w okresie T .

Z porównania zależności (1) i (2) wynika, że wartość współczynnika oporu ruchu tocznego wynosi

$$\mu_o = \frac{h}{S} \quad (3)$$

Wysokość podnoszenia h wyznaczyć można z geometrii zastosowanego wahadła fizycznego (rys. 2) [8].



Rys.2. Schemat położenia spoczynkowego oraz po pierwszym wychyleniu w_{max} wahadła i amplituda A przemieszczenia się środka kuli

W przypadku kuli wykonującej ruch oscylacyjny po powierzchni płaskiej, przy przetoczeniu się o nieznaczną wartość, z geometrii wynika, że

$$\frac{l-h}{l} = \cos \varphi \quad (4)$$

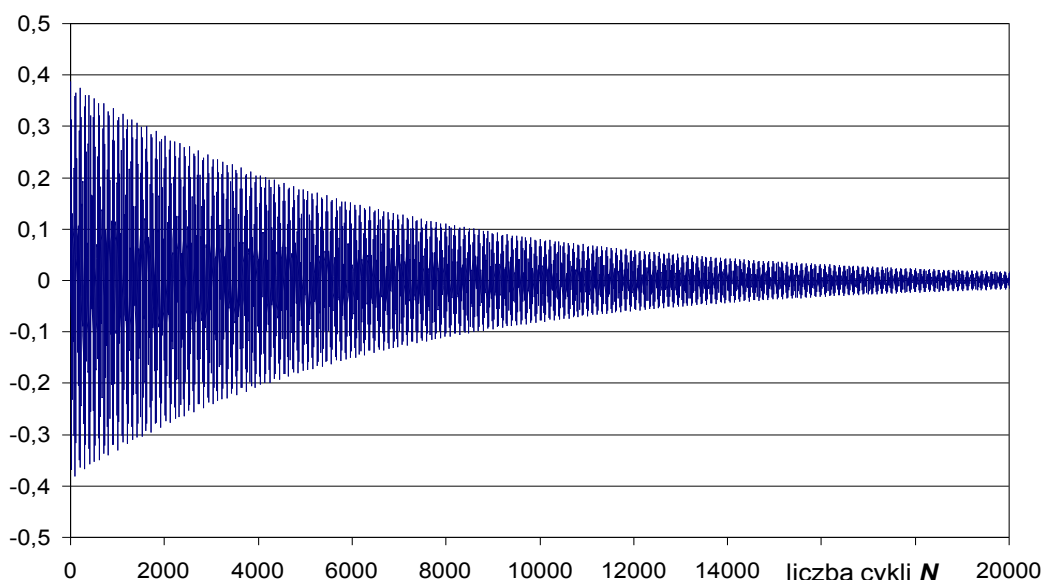
stąd;

$$h = l \cdot (1 - \cos \varphi) \quad (5)$$

Dla wymiarów geometrycznych wahadła tj. $l = 603$ [mm], średnicy kuli stalowej $d = 30$ [mm] oraz wychylenia środka ciężkości wahadła o $w = 16$ [mm], kąt wychylenia wynosi $\varphi \approx 1,53^\circ$. Wahadło o powyższych wymiarach wykazuje się okresem o wartości $T = 1,55$ [s], a obliczona wysokość podnoszenia wynosi $h = 0,215$ [mm].

W zależności od zastosowanych do badań materiałów i postaci geometrycznych współpracującej pary, całkowita droga względnego ruchu kuli po podłożu, wynika z tłumionego ruchu oscylacyjnego wahadła [1, 16]. W tym przypadku wahadło z kulą opiera się na poziomo ustawionej powierzchni próbki płaskiej, wykonanej z wybranych materiałów.

Przykład przebiegu drogi przebytej przez kulę wahadła, wykonanej ze stali łożyskowej po płaskim podłożu wykonanym ze stali o twardości 50HRC, w zależności od zadanej przez wychylenie wahadła wartości pierwszego przemieszczenia się środka kuli (amplituda A), pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Amplituda tocznego ruchu oscylacyjnego kuli po podłożu w zależności od liczby cykli

Drogę kuli ze stali łożyskowej po płaskim podłożu stalowym o twardości 50HRC wyznaczono z zależności

$$S = 2\pi \cdot \sum_{i=1}^{i=16000} A_i \quad (6)$$

Amplitudę i tego cyklu i wyznacza się z zależności

$$A(t) = A \cdot e^{-\beta \cdot t}, \quad (7)$$

przy czym amplituda drogi kuli przy pierwszym wychyleniu wahadła w_{max} wynosi $A = 0,387$ [mm], a wyznaczony współczynnik tłumienia wynosi $\beta = 0,000155723$, natomiast czas t zastąpić można przez $t = i \cdot T$, wtedy całkowita droga oscylacyjnego obtaczania się kuli po próbce płaskiej wynosi

$$S = 2\pi \cdot \sum_{i=1}^{i=16000} A_{i,T} \quad (8)$$

Obliczona sumaryczna wartość drogi S kuli po płaskim podłożu stalowym i technicznie suchej powierzchni styku, po $i=16000$ okresach, wynosi ponad 10 [m].

3. CHARAKTERYSTYKA BADANYCH PRÓBEK MATERIAŁÓW

Do badań użyto próbek o powierzchniach płaskich z następujących materiałów [17]:

Stal **40H** wg normy PN-72/H-84030, konstrukcyjna stal stopowa do ulepszania cieplnego i hartowania powierzchniowego;

a) skład chemiczny, %: C - 0,36; Mn - 0,50; Si - 0,17; Cr - 0,80; Ni_{max} - 0,30,

b) właściwości mechaniczne w stanie obrobionym cieplnie:

- wytrzymałość na rozciąganie, $R_m - 980$, MPa,
- granica plastyczności, $R_e - 780$, MPa,
- wydłużenie względne, $A - 10$, %,
- minimalna udarność, KCU - 600, kJ/m²,
- przewężenie względne, $Z - 45$, %,
- maksymalna twardość w stanie zmiękczonej, 217HB,

c) chropowatość $R_a = 0,32$, μm.

Stal **35HGS** wg normy PN-72/H-84030, konstrukcyjna stal stopowa do ulepszania cieplnego i hartowania powierzchniowego (izotermicznego):

a) skład chemiczny [%]: C - 0,32; Mn - 0,80; Si - 1,10; Cr - 1,10; Ni_{max} - 0,30,

b) właściwości mechaniczne w stanie obrobionym cieplnie:

- R_m - wytrzymałość na rozciąganie, 1620, MPa,
- granica plastyczności, $R_e - 1280$, MPa,
- wydłużenie względne, $A - 9$, %,
- minimalna udarność, KCU - 400, kJ/m²,
- minimalne przewężenie względne, $Z - 40$, %,
- maksymalna twardość w stanie zmiękczonej, 241HB,

c) chropowatość $R_a = 0,32$, μm.

Żeliwo szare **ZL200** wg normy PN-76/H-83101, posiadające dobre własności odlewnicze, odporne na ścieranie;

d) skład chemiczny, %: C - 3,52; Mn - 0,51; Si - 2,25; P - 0,31; S - 0,117,

e) właściwości mechaniczne:

- wytrzymałość na rozciąganie, $R_m - 200$, MPa,
- przybliżona twardość, 215HB,

c) chropowatość $R_a = 0,32$, μm.

d)

Poliamid **PA6** - termoplastyczne tworzywo polimerowe, odporne na działanie rozpuszczalników organicznych, olejów i tłuszczów, nie odporne na działanie kwasów, o następujących właściwościach mechanicznych:

- wytrzymałość na rozciąganie - 66, MPa,
- wytrzymałość na ściskanie - 61, MPa,
- wytrzymałość na ścinanie - 40, MPa,
- wydłużenie przy zerwaniu - 50, %.
-

Teflon **PTFE** - (policzterofluoroetylen) - termoplastyczne tworzywo polimerowe, odporne na działanie rozpuszczalników, olejów, tłuszczów, kwasów i zasad, niepalne, o następujących właściwościach mechanicznych;

- wytrzymałość na rozciąganie - 20, MPa,
- wytrzymałość na ściskanie - 10, MPa.

Styk kuli z podłożem płaskim współpracował na sucho i z czynnikiem pośrednim. Zastosowano do smarowania styku substancje ciekłe i plastyczne:

- wodę
- olej HIPOL 15F,
- smar ŁT-4S3

4. WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań współczynnika oporu oscylacyjnego ruchu tocznego μ_o za pomocą wahadła o określonej postaci konstrukcyjnej, dla technicznie suchych i smarowanych płaskich powierzchni próbek przedstawiono w tablicach.

Wskaźnik k_μ jest ilorazem współczynnika μ_o danej próbki w stosunku do współczynnika μ_o dla materiału wzorcowego (stal 40H).

Tablica.1. Współczynnik oporu ruchu oscylacyjnego μ_o łożyskowej kuli stalowej po płaskiej i technicznie suchej powierzchni próbki oraz wskaźnik k_μ

Materiał próbki (podłoże technicznie suche)	Średni czas do zatrzymania wahadła t [s]	Współczynnik oporu ruchu oscylacyjnego μ_o	Wskaźnik oporu tocznego k_μ
Stal 40H	13610	0,000 024	1
Żeliwo szare ZL200	12220	0,000 026	1,08
Poliamid PA6	1127	0,000 287	11,96
Teflon PTFE	393	0,000 827	34,46

Tablica.2. Współczynnik oporu ruchu oscylacyjnego μ_o łożyskowej kuli stalowej po płaskiej i smarowanej wodą powierzchni próbki oraz wskaźnik k_μ

Materiał próbki	Średni czas do zatrzymania wahadła t [s]	Współczynnik oporu ruchu oscylacyjnego μ_o	Wskaźnik oporu tocznego k_μ
Stal 40H	12526	0,000 026	1
Żeliwo szare ZL-200	10790	0,000 030	1,15
Poliamid PA6	1010	0,000 321	13,35
Teflon PTFE	346	0,000 940	36,15

Tablica.3. Współczynnik oporu ruchu oscylacyjnego μ_o łożyskowej kuli stalowej po płaskiej i smarowanej olejem Hipol 15F powierzchni próbki oraz wskaźnik k_μ

Materiał próbki smarowany olejem Hipol 15F	Średni czas do zatrzymania wahadła t [s]	Współczynnik oporu ruchu oscylacyjnego μ_o	Wskaźnik oporu tocznego k_μ
Stal 40H	10130	0,000 032	1
Żeliwo szare ZL-200	5560	0,000 058	1,81
Poliamid PA6	705	0,000 460	14,37
Teflon PTFE	270	0,001 207	37,72

Tablica.4. Współczynnik oporu ruchu oscylacyjnego μ_o łożyskowej kuli stalowej po płaskiej i smarowanej smarem ŁT - 4S3 powierzchni próbki oraz wskaźnik k_μ

Materiał próbki	Średni czas do zatrzymania wahadła t [s]	Współczynnik oporu ruchu oscylacyjnego μ_o	Wskaźnik oporu tocznego k_μ
Stal 40H	1150	0,000 282	1
Żeliwo szare ZL-200	848	0,000 383	1,36
Poliamid PA6	314	0,001 038	3,68
Teflon PTFE	164	0,001 995	7,07

5. UWAGI KOŃCOWE

Badania wykazały, że wyznaczony za pomocą wahadła o określonej postaci konstrukcyjnej i geometrycznej, współczynnik oporu ruchu oscylacyjnego μ_o charakteryzuje się bardzo małymi wartościami. Dla porównania, przyjmowane w literaturze współczynniki tarcia tocznego f dla kulki stalowej hartowanej toczącej się po bieżni stalowej hartowanej wynoszą w granicach 0,0005 - 0,001 [cm].

W przypadku badania, przy ruchu oscylacyjnym, bezwymiarowa wartość współczynnika μ_o , w istotny sposób zależy od miejsca przyłożenia obciążenia (rys. 1.). Zależy także w dużej mierze od cech mechanicznych współpracujących materiałów.

Dla materiałów twardych powierzchnia styku pomiędzy kulą stalową a próbką jest bardzo mała, tzw. styk punktowy. W przypadku próbek z materiałów miękkich kula zagłębia się zwiększając jednocześnie powierzchnię styku (wymiar b_H). Występujące odkształcenie powierzchni zależne jest także od obciążenia.

W przypadku materiałów o mniejszej twardości (PA6, PTFE) powierzchnia styku jest większa, a współczynnik oporu μ_0 ma większą wartość.

Przeprowadzone badania z zastosowaniem środków smarnych wykazały w układzie wahadła istotny wpływ lepkości smaru na utratę energii, a co za tym idzie na wielkość współczynnika oporu ruchu oscylacyjnego μ_0 .

W przypadku smarowania styku środkami o mniejszej lepkości (woda, olej) wartość współczynnika oporu w ruchu oscylacyjnym μ_0 była niewiele większa niż przy technicznie suchych powierzchniach styku. Po zastosowaniu smaru plastycznego różnica ta wzrosła o rząd wielkości. Wynika z tego, że wpływ substancji smarujących na opory ruchu tocznego jest istotny, dotyczy to szczególnie małych obciążeń

W [18] podano informację, że niewłaściwe smarowanie jest przyczyną około 50% uszkodzeń łożysk.

Smarowanie nie prowadzi do zmniejszania oporów ruchu w łożyskach tocznych. Stosuje się je z innych powodów; zwiększenia trwałości, lepszego odprowadzenia ciepła powstającego pomiędzy elementami tocznymi a bieżnią i zmniejszenia głośności pracy łożyska. Smarowanie ma także na celu zmniejszenie oporów ruchu ślizgowego między elementami tocznymi, a rozdzielającym je koszykiem łożyska, zabezpieczenie metalowych elementów łożyska przed korozją.

6. LITERATURA

- [1] BOBROWSKI C.: Fizyka - krótki kurs. WNT, Warszawa 1994.
- [2] BOWDEN F.P., TABOR D.T.: Wprowadzenie do trybologii. WNT, Warszawa 1980.
- [3] Encyklopedia Powszechna. PWN, wydanie trzecie, t. 4, Warszawa, 1987.
- [4] HEBDA M., JANECKI J.: Tarcie, smarowanie i zużycie części maszyn. WNT, W-a 1972.
- [5] HEBDA M., WACHAL A.: Trybologia. WNT, Warszawa 1980.
- [6] KOREWA W., ZYGMUNT K.: Podstawy konstrukcji maszyn. T. 2. WNT, Warszawa 1973.
- [7] KNAPCZYK H., BOROWIEC L.: Łożyska kulkowe wieńcowe w osprzęcie roboczym wyrobów specjalnych. Biuletyn Techniczny OBRUM: Szybkobieżne pojazdy gąsienicowe, nr 4. Gliwice XI.1993.
- [8] KOWAL A.: Badania oporu ruchu tocznego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, z. 246, Górnictwo, Gliwice 2000.
- [9] KOWAL A.: Opory ruchu obrotowego jednorzędowego łożyska kulkowego wieńcowego. Biuletyn Naukowo-Techniczny OBRUM: Szybkobieżne pojazdy gąsienicowe, nr 5, s. 121-128. Gliwice 1994.
- [10] KOWAL A.: Opory ruchu tocznego. Materiały XX Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn. Polanica Zdrój 24-28.09.2001 (w druku).
- [11] KOWAL A.: Promień styku kuli z płaską powierzchnią w naprężeniach kontaktowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, z. 246, Górnictwo, Gliwice 2000.
- [12] KOWAL A.: Sposób i urządzenie do wyznaczania współczynnika tarcia. Zgłoszenie patentowe nr P - 342126 z dnia 16.09.2000.
- [13] KOWAL A., SPAŁEK J., KNAPCZYK H., BOROWIEC L.: Łożysko wieńcowe. Patent PL 179738 B1 z dnia 31.10.2000 WUP 10/00.
- [14] LAWROWSKI Z.: Tribologia. PWN, Warszawa 1993.
- [15] Mały poradnik mechanika. Tom I, II. WNT, 1994.
- [16] OSIŃSKI Z.: Teoria drgań. PWN, Warszawa 1980.
- [17] RADZIEJ T.: Analiza oporów oscylacyjnego ruchu tocznego. Praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Śląska. Gliwice-Rybnik 2001.
- [18] SKF: Narzędzia do bezproblemowej obsługi łożysk. Mijdrecht (Holandia) X.1997.

[19] Sprawozdanie z badań stanowiskowych żurawia TD-50. Zakład Badań OBRUM, Gliwice 1987 (praca niepublikowana).

ROLLING RESISTANCE ESTIMATION

Abstract: The paper presents the method of estimation and comparison of the rolling resistance coefficients for the sphere made of the bearing steel, oscillatory rotating on the flat surface of the sample made of selected material. The method is based on the comparison of potential energy imposed on the physical pendulum with energy dissipated on the sphere/sample interface. Examples of resulting rolling resistance coefficients in environment of lubricants applied are shown.

Recenzent: dr inż. Jacek SPAŁEK