

Aleksander KOWAL  
Politechnika Śląska, Gliwice

## BADANIA OPORU RUCHU TOCZNEGO

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań pozwalające porównać współczynniki tarcia tocznego wyznaczone za pomocą wahadła przy ruchu oscylacyjnym. Wyniki te zastawiono w tablicy.

## RESEARCH ON THE ROLLING FRICTION

**Summary.** In this article there are results, of the research, which enables us to compare coefficients of rolling friction calculated by means of oscillating pendulum.

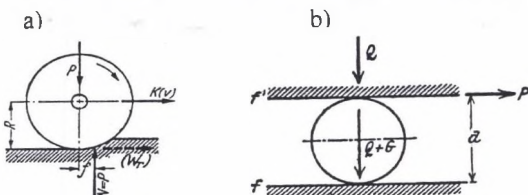
### 1. Wstęp

Opory ruchu przy tarcniu tocznym są od dawna zdefiniowane, a obecnie wytwornie łożysk tocznych podają zależności do obliczania oporów ruchu, zazwyczaj momentu tarcia w produkowanych przez siebie łożyskach, jak np. w łożyskach stożkowych [1 i 2], łożyskach wielkogabarytowych (wieńcowych) [3 i 4].

Tarcie toczne jako tarcie statyczne (spoczynkowe) definiowane jest historycznie od dziesiątków lat w ten sposób, że koło o dużej twardości obtacza się na szynie z momentem tarcia  $M=P \cdot f$ , przy czym  $f$  nazywane jest liczbą tarcia i wyrażone jest w jednostce długości [cm]. Oryginalny obraz sprzed półwiecza ([5]), wyjaśniający zasadę działania tarcia tocznego, pokazano na rys. 1. Na wielkość momentu tarcia tocznego, oprócz materiałów koła i szyny, wpływa obciążenie  $P$  (rys. 1a). Opór tarcia wyznaczano z zależności:

$$W_r = P \cdot f / R \quad (1)$$

Tarcie spoczynkowe (statyczne) jest wtedy, gdy  $W_r \leq P \cdot \mu_0$  co oznacza, że  $f/R < \mu_0$ .



Rys. 1. Obraz z [5] przedstawiający mechanizm tarcia tocznego

Fig. 1. Picture from [5] introducing the mechanism of rolling friction

Z wywodów ([5]) wynika, że średnie ramię momentu tarcia tocznego wynosi dla:

- żeliwa, staliwa i stali po stali;  $f \cong 0,05$  cm,
- utwardzona kula stalowa lub walec na bieżni pierścienia łożyskowego;  $f =$  od 0,0005 do 0,001 cm.

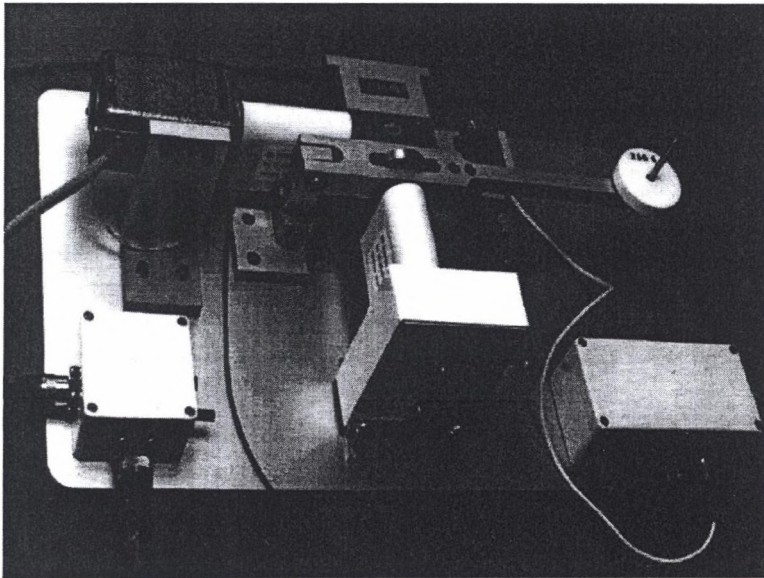
Powyższe, bardziej szczegółowe dane ilustruje tablica 1 [6].

Tablica 1

Wartości współczynników tarcia tocznego dla niektórych materiałów wg [6]

Materiał toczącego się elementu i podłoża	Współczynnik tarcia tocznego $f$ [cm]
Krążek drewniany po drewnie	0,06-0,15
Krążek drewniany po stali	0,03
Koło stalowe po stali (szyna kolejowa)	0,005
Koło stalowe po kamieniu	0,15
Koło stalowe po asfalcie	0,60
Koło stalowe po gumie	1,5-3,0
Kulka stalowa hartowana po bieżni stalowej hartowanej	0,0005-0,001

Nowoczesne procesy badawcze dotyczące tego zagadnienia realizowane są na różnych stanowiskach badawczych, a przykład takiego stanowiska jest pokazany na rysunku 2.

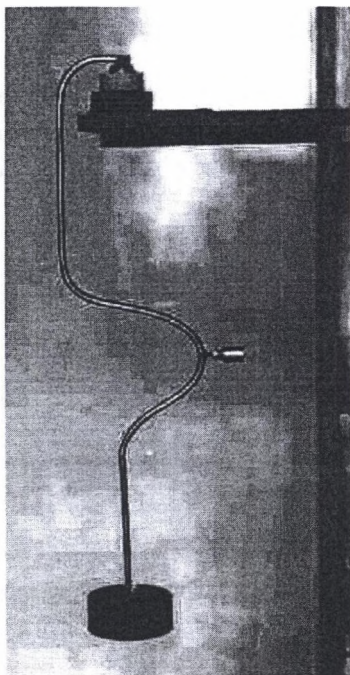


Rys. 2. Stanowisko badawcze firmy PLINT&Partners LTD (TE 91/6 Sliding/rolling Traction Force Module) [7]

Fig.2. Test rig of Company PLINT&Partners LTD (TE 91/6 Sliding/rolling Traction Force Module) [7]

## 2. Badania własne

W różnych obliczeniach przyjmowane są wartości współczynników tarcia tocznego z tablicy 1. Wydaje się, że wartości te są zbyt uśrednione dla różnych przypadków materiałowych oraz geometrii styku ciał. Stąd też do oceny porównawczej wartości współczynników tarcia tocznego dla różnych par materiałowych wykorzystano urządzenie wg pomysłu autora w postaci wahadła pokazanego na rys. 3.



Rys.3. Stanowisko badawcze do oceny współczynnika oscylacyjnego tarcia tocznego  
Fig.3. Test rig for evaluation of oscillating coefficient of rolling friction

Do układu wahadła, kula - podłoże z różnych materiałów, dostarczano energię potencjalną  $E_p$  przez wychylenie, uzyskując określoną wysokość podnoszenia  $h$  środka ciężkości masy wahadła.

Dostarczona wartość energii potencjalnej

$$E_p = m \cdot g \cdot h, \quad (2)$$

gdzie:  $m$  – masa wahadła,

$g$  – przyspieszenie ziemskie,

$h$  – wysokość podnoszenia.

Po wprawieniu wahadła w ruch energia potencjalna zamieniana jest w pracę tarcia. Pracę tarcia do chwili zatrzymania się ruchu wahadła można z wystarczającą dokładnością wyznaczyć z zależności:

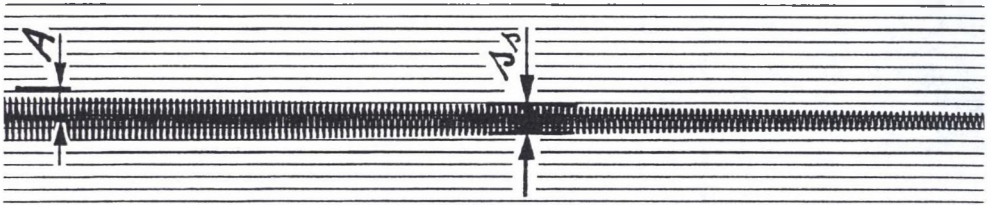
$$L_T = T \cdot S = m \cdot g \cdot \mu_o \cdot i \cdot s_s, \quad (3)$$

gdzie:  $T$  – siła tarcia,  
 $S$  – całkowita droga tarcia,  
 $\mu_o$  – współczynnik oporów ruchu tocznego,  
 $i$  – całkowita liczba wahanć wahadła,  
 $s_s$  – uśredniona droga pojedynczego, względnego ruchu między kulą i podłożem.

Z równań (2) i (3) wynika, że dla oscylacyjnego ruchu tocznego wartość współczynnika oporu, zależnego od liczby wahanć wahadła, wynosi:

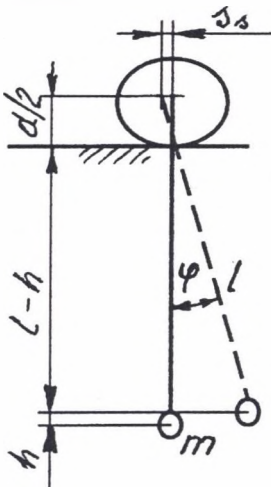
$$\mu_o = \frac{h}{i \cdot s_s} \quad (4)$$

W zależności od zastosowanych do badań materiałów i postaci geometrycznych współpracującej pary uśredniona droga jednego względnego ruchu kuli po podłożu  $s_s$  wynika z logarytmicznego dekrementu tłumienia. Przykład środkowej części rzeczywistego przebiegu tłumienia pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Uśredniona droga tocznienia kuli  
 Fig. 4. Average way of ball rolling

Liczba ruchów oscylacyjnych pozwala przyjąć w przybliżeniu, że  $s_s = A$ , co oznacza, że uśredniona droga tocznienia się kuli po próbce płaskiej  $s_s$  w środku długości całkowitego przebiegu jest równa drodze pierwszej amplitudy  $A$ , wywołanej pierwszym odchyleniem wahadła.



Rys.5. Schemat położenia spoczynkowego oraz pierwsze odchylenie wahadła  
 Fig.5. Scheme of position at rest and the first oscillation of pendulum

W przypadku kuli wykonującej ruch oscylacyjny po powierzchni płaskiej, przy przetoczeniu się o nieznaczną wartość  $s_s$ , z geometrii (rys. 5) wynika, że

$$\frac{l-h}{l} = \cos \varphi, \quad (5)$$

stąd 
$$h = l \cdot (1 - \cos \varphi) \quad (6)$$

Uśrednioną drogę względnego ruchu w styku pomiędzy kulą i współpracującym elementem można wyznaczyć z proporcji  $\pi d/360 = s_s / \varphi$ , gdzie kąty wyrażone są w stopniach. Wtedy

$$s_s = \frac{\varphi}{360} \cdot \pi \cdot d \quad (7)$$

Podstawiając (6) i (7) do (4) uzyskuje się wzór pozwalający z dużym przybliżeniem wyznaczyć współczynnik oporów ruchu oscylacyjnego kuli o średnicy  $d$  po powierzchni płaskiej w zależności od długości wahadła  $l$ , początkowego kąta jego wychylenia  $\varphi$  i od liczby wahníeć  $i$ , a mianowicie

$$\mu_o = \frac{360}{\varphi} \cdot \frac{l \cdot (1 - \cos \varphi)}{i \cdot \pi \cdot d} \quad (8)$$

Dla wymiarów geometrycznych wahadła, tj.  $l = 603$  mm, średnicy kuli stalowej  $d = 30$  mm oraz wychylenia środka ciężkości wahadła o 16 mm kąt wychylenia wynosi  $\varphi \approx 1,53^\circ$ . Wahadło o powyższych wymiarach wykazuje 77 pojedynczych, tj. jednokierunkowych wahníeć na minutę. Dla tych wymiarów geometrycznych i stałej wartości zadawanej pierwszemu wychyleniu, a więc także wartości pierwszej amplitudy  $A$  współczynnik oporu ruchu oscylacyjnego, obliczony z zależności (8), wynosi

$$\mu_o = \frac{0,536}{i} \quad (9)$$

W tablicy 2 umieszczono wyniki wstępnych badań oporów ruchu tocznego kuli ze stali łożyskowej, oscylacyjnie obtaczającej się po elementach o płaskiej powierzchni, wykonanych z różnych materiałów.

Obecnie wprowadza się wiele nowych materiałów o różnych własnościach mechanicznych. Przedstawiona metoda badania oporów oscylacyjnego ruchu tocznego pozwala na prosty i szybki sposób porównania oporów ruchu tocznego dla różnych współpracujących materiałów.

Tablica 2

Współczynnik oporu w ruchu oscylacyjnym łożyskowej kuli stalowej po płaskiej i technicznie suchej powierzchni próbki oraz wskaźnik  $k_{\mu}$ , wyrażający iloraz współczynników oporu  $\mu_0$  danej próbki do oporu materiału wzorcowego (Lp. 1)

Lp.	Materiał próbki (podłoże)		Czas do zatrzymania wahadła t [s]	Liczba pojedynczych wahań i	Współczynnik oporu oscylacyjnego ruchu tocznego $\mu_0$	Wskaźnik oporu tocznego $k_{\mu}$
1	Wzorec twardości stali, 50HRC		15545	19897	0,000 03	1
2	Węgiel spiekany SC30 typu SPKN 1504 EDR		9780	12518	0,000 04	1,3
3	Stopowa stal nierdzewna		8400	10752	0,000 05	1,6
4	Stal resorowa, szlifowana		15559	19915	0,000 03	1,0
5	Blacha stalowa ocynkowana		3765	4819	0,000 11	3,6
6	Stal St5		8040	10291	0,000 05	1,6
7	Stal St0, na powierzchni silna korozja		778	995	0,000 54	18,0
8	Tlenek aluminium $Al_2O_3$		9395	12025	0,000 04	1,3
9	Aluminium o grub. 0,1 mm	na podłożu drewnianym	1795	2297	0,000 23	7,6
10		na podłożu stalowym	3079	3941	0,000 14	4,6
11	Miedź		3732	4776	0,000 11	3,6
12	Mosiądz		9503	12163	0,000 04	1,3
13	Braz berylowy		4785	6124	0,000 09	3,0
14	Braz fosforowy		7863	10064	0,000 05	1,6
15	Poliamid PA6		375	480	0,001 11	37,0
16	PCV –linoleum o grub. 1,5 mm		56	72	0,007 47	249,0
17	Klینگeryt, grub. 3 mm		75	96	0,005 57	185,6
18	Tekstolit o grub. 2,1 mm		1735	2220	0,000 23	7,6
19	Papier		300	384	0,001 39	46,3
20	Płyta pilśniowa o grub. 6 mm		494	632	0,000 84	28,0
21	Wykładzina cierna – kolor biały, do bębnow maszyn wyciągowych		78	100	0,005 40	180,0
22	Wykładzina na koła linowe, kolor brązowy		110	141	0,003 70	123,3
23	Taśma gumowa do przenośnika o grub. 10 mm		118	151	0,003 50	116,6
24	Warstwa 0,1 mm gumy na podłożu stalowym		672	862	0,000 62	20,6
25	Pleksyglas o grub. 2 mm		885	1136	0,000 47	15,6
26	Celuloid-folia do ksero o grub. 0,08 mm	na podłożu drewnianym	550	706	0,000 75	25,0
27		na podłożu stalowym	2664	3419	0,000 15	5,0
28	Grafit		228	292	0,001 82	60,6
29	Kamień szlifowany	granit	2940	3773	0,000 14	4,6
30		marmur	1525	1957	0,000 27	9,0
31		krzemień $SiO_2$	9925	12737	0,000 04	1,3
32		bazalt	8947	11482	0,000 05	1,6
33	Drewno, wzdłuż stojów	dąb	525	674	0,000 79	26,3
34		czereśnia	519	666	0,000 80	26,6
35		buk	544	698	0,000 77	25,6

## LITERATURA

1. Katalog firmy Timken: Technisches Handbuch. Kegelrollenlager 1987
2. Katalog główny SKF nr 3200, 1985
3. Katalog Hoesch Rothe Erde Schmiedag AG: Großwälzlager. Dortmund 1990
4. Katalog Zawierciańskiej Fabryki Maszyn „ZAFAMA”: Łożyska toczne wielkogabarytowe. Wyd. III, 1997
5. Dubbel H. i in.: Taschenbuch für den Maschinenbau. Wyd. IX, T. I, Springer-Verlag, Berlin 1943
6. Mały poradnik mechanika. Tom I, s. 225. WNT, Warszawa 1985
7. PLINT&partners ltd: <http://www.plint.co.uk/at1/indiv/sect05/te91a6.htm/> 15.06.2000

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Karol F.Reich

## Abstract

Rolling friction, as the static friction (friction of rest) is defined historically from many years in such way, that the high hardness wheel rolls on the rail with the friction torque  $M=Pf$  [N·m], where  $f$  is called number of friction and is expressed by the length unit [cm].

For calculation of motion losses the above given values of rolling friction coefficients are applied. It can be assumed that these values are also the mean values for possible different material cases and different geometry of contacting bodies. Hence, for the comparative evaluation of rolling friction coefficients of different material pairs, the device designed by author of this paper, in form of pendulum introduced in Fig. 3 has been applied.

For the pendulum system, with the ball made of different materials and resting on the flat foundation, as result of oscillation the potential energy  $E_p$ , has been delivered; the determined height of lifting  $h$  of centre of gravity of pendulum mass has been received.

Delivered value of potential energy  $E_p = m \cdot g \cdot h$ .

After putting the pendulum into motion, the potential energy is converted into the friction work. Friction work up to the moment of stopping the motion of pendulum, with good precision, can be determined from the dependence  $L_T = T \cdot S = m \cdot g \cdot \mu_o \cdot i \cdot s_s$ .

It results from comparison, that for oscillating rolling motion the value of resistance coefficient depending on the number of pendulum oscillation is  $\mu_o = h/(i \cdot s_s)$ .

The paper introduces the method of determining of rolling friction coefficient at the oscillation motion by means of pendulum. The initial results of investigation in form of rolling friction coefficient values for the materials: steel bearing ball of  $\varnothing$  30 mm diameter and the flat specimen made of assumed materials.