

Anita PTAK*, **Wojciech WIELEBA***,
Piotr KOWALEWSKI*, **Dymitry CAPANIDIS***

WPLYW WILGOTNOŚCI I TEMPERATURY POWIETRZA NA WSPÓŁCZYNNIK TARCIA STATYCZNEGO WYBRANYCH PAR ŚLIZGOWYCH METAL-POLIMER

**THE EFFECT OF HUMIDITY AND TEMPERATURE OF AIR
ON THE STATIC FRICTION COEFFICIENT OF SELECTED
METAL-POLYMER SLIDING COUPLES**

Słowa kluczowe:

współczynnik tarcia statycznego, wilgotność, temperatura otoczenia, polimery

Key words:

coefficient of static friction, humidity, ambient temperature, polymers

Streszczenie

Warunki otoczenia występujące podczas współpracy elementów nie pozostają bez wpływu na wartość współczynnika tarcia statycznego. W lite-

* Politechnika Wroclawska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, ul. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław.

raturze można znaleźć przede wszystkim opracowania dotyczące wpływu temperatury na procesy tarcia materiałów polimerowych. Wciąż jednak niewiele jest informacji na temat wpływu wilgotności na te procesy. W niniejszej pracy podjęto próbę analizy wpływu temperatury i wilgotności powietrza na współczynnik tarcia statycznego wybranych par ślizgowych typu metal-polimer. Przedstawiono wyniki badań dla wybranych par ślizgowych typu metal-polimer w warunkach tarcia technicznie suchego. Badania przeprowadzono na stanowisku typu „pin-on-disc” w komorze klimatycznej w zakresie temperatury od 10°C do 90°C oraz wilgotności względnej od 35% do 95%.

WPROWADZENIE

Charakterystyczną cechą materiałów polimerowych jest lepkosprężystość. Cecha ta powoduje, że właściwości ślizgowe są silnie uzależnione od temperatury pracy. To ona decyduje, w jakim stanie fizycznym znajduje się materiał polimerowy i jak będzie się on zachowywał podczas pracy. Jak wskazuje literatura [L. 2, 5, 7, 8], dla niektórych materiałów polimerowych wraz ze wzrostem temperatury rośnie także ich współczynnik tarcia po stali, natomiast dla niektórych sytuacja jest odwrotna – współczynnik tarcia maleje. Nie bez znaczenia jest również wilgotność względna powietrza. Ilość wchłoniętej z otoczenia wody przez materiał polimerowy w istotny sposób wpływa na jego właściwości [L. 3, 4, 8, 9] zwłaszcza w przypadku poliamidów [L. 1]. Jest to proces z jednej strony negatywny, gdyż wiąże się ze zmianą wymiarów przez materiał polimerowy (pęcznienie), ale z drugiej strony, ze względu na opory tarcia, wchłanianie wilgoci może mieć efekt pozytywny. Stwierdzono między innymi, że wraz ze wzrostem wilgotności względnej powietrza obserwuje się obniżenie wartości współczynnika tarcia dla poliamidu [L. 1], a także innych materiałów polimerowych [L. 6]. Wynika to między innymi ze zmniejszenia oddziaływań elektrostatycznych oraz pojawienie się tarcia granicznego [L. 4] w miejsce tarcia suchego.

METODYKA BADAWCZA

Badania tribologiczne wpływu warunków otoczenia na opory tarcia przeprowadzono na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym typu „pin-on-disc”, które było umieszczone w komorze klimatycznej o regulowanej temperaturze i wilgotności względnej. Polimerowe próbki

o kształcie sworznia (średnica 8 mm) podczas badań współpracowały ślizgowo z obracającą się tarczą wykonaną ze stali C45. Do badań wybrano trzy materiały polimerowe: PEEK, POM oraz PTFE. Polimery te są jednymi z częściej wykorzystywanych na ślizgowe elementy maszyn i praktycznie nie chłoną wilgoci z powietrza.

Celem badań tribologicznych było wyznaczenie zmian współczynnika tarcia statycznego μ_s w funkcji temperatury T [°C] oraz wilgotności względnej f [%]. Eksperyment przeprowadzono w zakresie wilgotności względnej powietrza od 35% do 95% i temperaturze otoczenia od 10°C do 90°C. Po osiągnięciu zadanych parametrów (temperatury T [°C] oraz wilgotności względnej f [%]), próbka przebywała w stabilnych warunkach przez co najmniej pół godziny. Badania prowadzono przy stałej wartości nacisku jednostkowego $p = 1$ MPa. Podczas doświadczenia rejestrowano siłę tarcia i na jej podstawie określano wartość współczynnika tarcia statycznego μ_s . Wszystkie pomiary powtarzano pięciokrotnie, ostateczne wyniki uśredniono, określono odchylenie standardowe i przedziały ufności.

Do realizacji eksperymentu wykorzystano plan rotalny na pięciu poziomach wartości dla dwóch zmiennych niezależnych (T , f). Jako funkcje regresji mierzonych wielkości wyjściowych przyjęto wielomiany drugiego stopnia dla dwóch zmiennych:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_1^2 + a_4X_2^2 + a_5X_1X_2,$$

gdzie: a_0, \dots, a_5 – współczynniki wielomianu,
 X_1, X_2 – wielkości zmienne (T, f).

Współczynniki wielomianów wyznaczano metodą najmniejszych kwadratów.

Otrzymane funkcje poddano ocenie statystycznej obejmującej wyznaczenie wartości wielowymiarowego współczynnika korelacji R oraz wartości odchylenia standardowego, a także test istotności F . Funkcje te posłużyły następnie do wykreślenia wykresów przestrzennych i warstwicznych zmian współczynnika tarcia statycznego μ_s w zależności od zmian wartości T oraz f .

WYNIKI I ANALIZA BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Wyniki badań tribologicznych dla materiałów PEEK, POM oraz PTFE przedstawiono w **Tabeli 1**, natomiast ocenę statystyczną otrzymanych funkcji w **Tabeli 2**. Uzyskane wyniki nie dają podstaw do odrzucenia funkcji jako nieprawidłowo opisujących uzyskane wyniki badań ze statystycznego punktu widzenia.

Charakterystyki współczynnika tarcia statycznego μ_s badanych materiałów polimerowych po stali w zależności od temperatury otoczenia T [°C] oraz wilgotności względnej f [%] uzyskane na podstawie funkcji regresji zaprezentowano na **Rys. 1–3**.

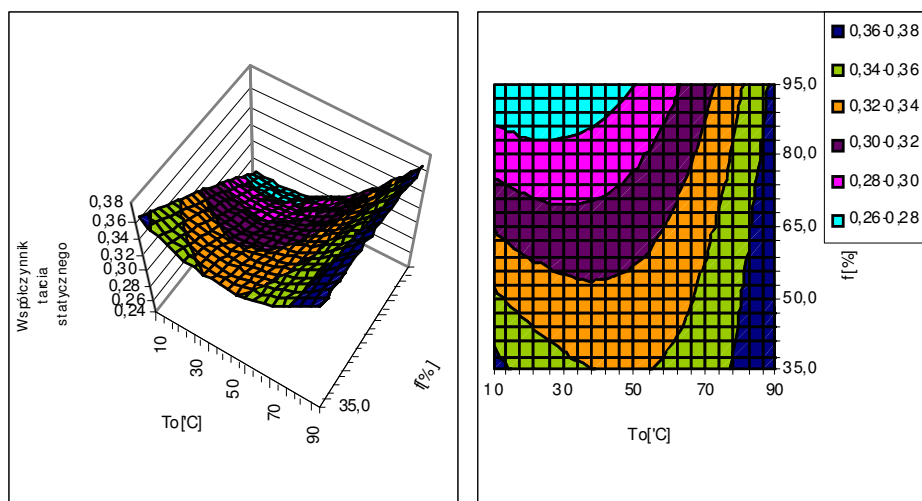
Tabela 1. Wyniki badań wybranych polimerów współpracujących ślizgowo ze stalą
Table 1. Results of investigations of selected polymers sliding on steel

Lp.	Wartości zadane			Wielkości mierzone PEEK		Wielkości mierzone POM		Wielkości mierzone PTFE	
	To	f	p	μ	α	μ	α	μ	α
	[°C]	[%]	[MPa]	[-]		[-]		[-]	
1	50,00	35,0	1,0	0,36	±0,043	0,16	±0,009	0,13	±0,010
2	21,72	43,8	1,0	0,32	±0,021	0,15	±0,012	0,14	±0,018
3	78,28	43,8	1,0	0,36	±0,023	0,16	±0,011	0,17	±0,020
4	10,00	65,0	1,0	0,32	±0,044	0,25	±0,020	0,18	±0,016
5	50,00	65,0	1,0	0,32	±0,032	0,19	±0,008	0,19	±0,007
6	50,00	65,0	1,0	0,31	±0,032	0,19	±0,008	0,19	±0,007
7	50,00	65,0	1,0	0,31	±0,032	0,18	±0,008	0,20	±0,007
8	50,00	65,0	1,0	0,30	±0,032	0,20	±0,008	0,19	±0,007
9	50,00	65,0	1,0	0,32	±0,032	0,20	±0,008	0,18	±0,007
10	90,00	65,0	1,0	0,36	±0,023	0,16	±0,009	0,17	±0,014
11	21,72	86,2	1,0	0,30	±0,020	0,21	±0,003	0,20	±0,011
12	78,28	86,2	1,0	0,37	±0,020	0,14	±0,011	0,17	±0,010
13	50,00	95,0	1,0	0,24	±0,021	0,16	±0,018	0,15	±0,016

Tabela 2. Współczynniki wielomianów (funkcji regresji) opisujących współczynniki tarcia statycznego μ_s w funkcji warunków otoczenia (temperatury T i wilgotności względnej f) oraz ich analiza statystyczna

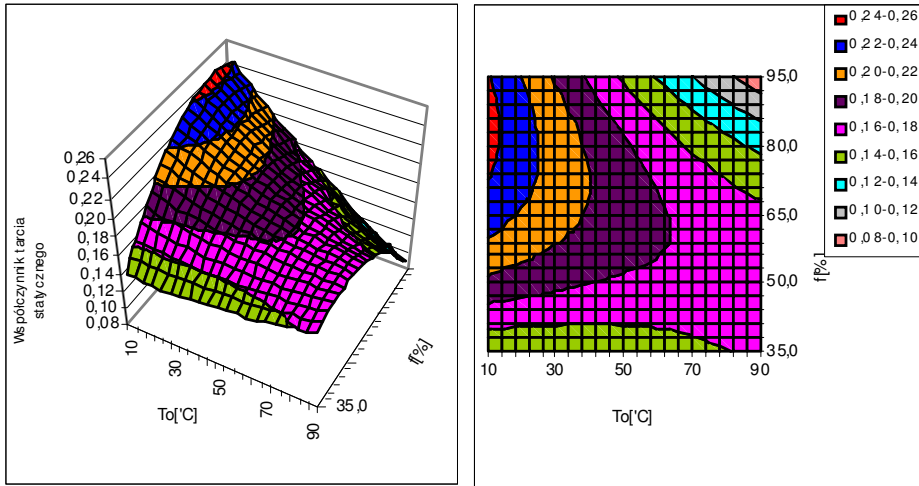
Table 2. The coefficients of polynomials (regression functions) describing the coefficients of static friction μ_s as a function of environment conditions (temperature T , humidity f) and statistical analyses of regression functions

Postać funkcji	Współczynniki wielomianu	Materiał polimerowy		
		PEEK	POM	PTFE
$\mu_s = a_0$	a_0	0,44196	-0,07269	-0,12084
$+ a_1 T$	a_1	-0,00269	0,00114	0,00187
$+ a_2 f$	a_2	-0,00148	0,00763	0,0076
$+ a_3 T^2$	a_3	2,2E-05	4,8E-06	-4,8E-06
$+ a_4 f^2$	a_4	-3,4E-06	-4,3E-05	-4,5E-05
$+ a_5 T f$	a_5	1,9E-05	-3,7E-05	-2,3E-05
Analiza statystyczna				
Odchylenie standardowe		0,0346	0,0304	0,0214
Współczynnik korelacji R (dla $\alpha = 0,01$ $R_{kr} = 0,886$)		0,8420	0,9112	0,9344
Test F (dla $\alpha = 0,05$ $F_{kr} = 3,97$)		3,41	6,85	9,63



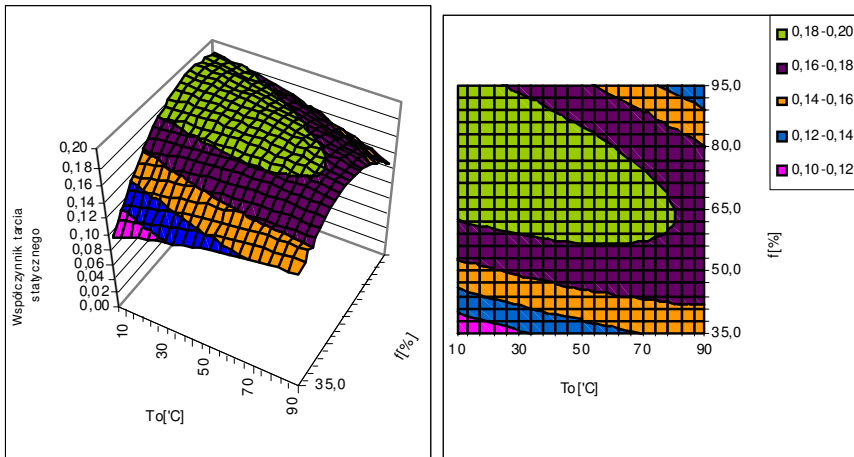
Rys. 1. Wpływ warunków otoczenia (temperatury T oraz wilgotności względnej f) na wartość współczynnika tarcia statycznego μ_s dla pary ślizgowej stal-PEEK

Fig. 1. The effect of environment conditions (temperature T , humidity f) on the coefficient of static friction μ_s for sliding couple steel-PEEK



Rys. 2. Wpływ warunków otoczenia (temperatury T oraz wilgotności względnej f) na wartość współczynnika tarcia statycznego μ_s dla pary ślizgowej stal–POM

Fig. 2. The effect of environment conditions (temperature T , humidity f) on the coefficient of static friction μ_s for sliding couple steel–POM



Rys. 3. Wpływ warunków otoczenia (temperatury T oraz wilgotności względnej f) na wartość współczynnika tarcia statycznego μ_s dla pary ślizgowej stal–PTFE

Fig. 3. The effect of environment conditions (temperature T , humidity f) on the coefficient of static friction μ_s for sliding couple steel–PTFE

PODSUMOWANIE

Analizując otrzymane charakterystyki współczynnika tarcia statycznego μ_s wykonane na podstawie przeprowadzonych badań tribologicznych materiałów polimerowych, można sformułować następujące spostrzeżenia i wnioski:

- Wyniki ruchowych badań tribologicznych, prowadzonych w zmiennych warunkach temperatury otoczenia oraz wilgotności względnej potwierdziły, iż zauważalny jest wpływ wymienionych parametrów na wartość współczynnika tarcia stycznego μ_s .
- Przebieg zmian wartości współczynnika tarcia statycznego μ_s jest niestabilny w całym zakresie wartości badanych parametrów T oraz f . Zauważono duży rozrzut wartości współczynników tarcia w tej samej temperaturze dla różnych poziomów wilgotności (np. dla PEEK wynosi od 0,26 do 0,32 dla temperatury $T = 40^\circ\text{C}$).
- Dla wszystkich materiałów można zauważyć, że największe wartości współczynników tarcia statycznego μ_s i kinetycznego μ_k występują w temperaturach najniższych, jednak w różnych zakresach wartości wilgotności względnej f .
- Interesującą obserwacją jest występowanie najmniejszych wartości współczynnika tarcia statycznego μ_s dla PEEK po stali w skrajnych punktach wykresu warstwicowego – dla najniższej temperatury i najniższego poziomu wilgotności względnej, a także dla najwyższej temperatury i najwyższego poziomu wilgotności względnej.

Wyjaśnienie powyższych spostrzeżeń wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań w zakresie wpływu wilgotności i temperatury otoczenia na oddziaływania adhezyjne w badanych parach ślizgowych metal–polimer.

LITERATURA

1. Amuzu J.K.A.: The effect of humidity on friction and shear strength of nylon, *Journal of Materials Science Letters* 3 (1984), s. 291–292.
2. Belyj V.A., Sviridenok A.I., Petrokovec M.I., Savkin V.G.: *Trenie polimerov*. Moskwa, Izd. Nauka, 1972.
3. Gruin I.: *Materiały polimerowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2003.
4. Liu Y., Szlufarska L.: Effect of trace moisture on friction. *Appl. Phys. Lett.* Vol. 96, Iss. 10.1902 (2010).

5. Rymuza Z.: Trybologia polimerów ślizgowych. WNT Warszawa 1986.
6. Silva C.H., Tanaka D.H., Sinatora A.: The effect of load and relative humidity on friction coefficient between high density polyethylene on galvanized steel—preliminary results. *Wear* 225–229 (1999), s. 339–342.
7. Wieleba W.: Analiza procesów tribologicznych zachodzących podczas współpracy kompozytów PTFE po stali, Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław 2002.
8. Ziemiański K.: Zastosowanie tworzyw sztucznych w budowie maszyn, Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław 1995.
9. Żuchowska D.: Polimery konstrukcyjne. Wprowadzenie do technologii i stosowania, WNT, Warszawa 2000.

Recenzent:

Monika GIERZYŃSKA-DOLNA

Summary

Environmental conditions significantly affect the value of the coefficient of static friction during co-operation of sliding machine elements.

The studies about the influence of temperature on the friction processes can be found in the literature, but there is little information about the effect of humidity on these processes. The authors have attempted to analyse the influence of temperature and humidity on the coefficient of static friction of chosen sliding couples (a polymeric material on metal) under dry friction conditions in a climate chamber at temperatures ranging from +10°C to +90°C and relative humidity from 35% to 95%. Tribological investigations in the static friction were carried out on the rig “pin-on-disk.”