

Wojciech WIELEBA*

**WPLYW UKSZTAŁTOWANIA STRUKTURY
GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI STALI
NA WSPÓLCZYNNIK TARCIA STATYCZNEGO
WSPÓLPRACUJĄCYCH MATERIAŁÓW
POLIMEROWYCH**

**THE INFLUENCE OF SURFACE GEOMETRICAL
STRUCTURE OF STEEL ON THE STATIC FRICTION
COEFFICIENT OF POLYMER MATERIALS**

Słowa kluczowe:

badania tribologiczne, tarcie statycznego, materiały polimerowe

Key-words:

tribological research, static friction, polymer materials

WPROWADZENIE

Ze względu na stosunkowo dużą wartość współczynnika tarcia statycznego dla par polimerowo-metalowych, opory tarcia w odniesieniu do sił bezwładności odgrywają znaczącą rolę w zapotrzebowaniu mocy i stra-

* Politechnika Wroclawska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, ul. I. Łukaszczyka 7/9, 50-370 Wrocław, tel. (71) 320 27 74, e-mail: wojciech.wieleba@ pwr.wroc.pl.

tach energii podczas rozruchu. Minimalizacja oporów tarcia jest w tej sytuacji ważnym zagadnieniem dotyczącym eksploatacji polimerowych węzłów ślizgowych. Istotny wpływ na wartość współczynnika tarcia, w tym również statycznego dla skojarzeń ślizgowych polimer–metal wykazuje struktura geometryczna powierzchni (chropowatość, ukierunkowanie śladów obróbki itp.) współpracujących elementów, a zwłaszcza elementu wykonanego z materiału metalicznego [L. 2–5].

Przedstawione w artykule wyniki badań ukazują wpływ wyżej wymienionych czynników na współczynnik tarcia statycznego wybranych materiałów polimerowych po stali. Ponadto analiza wyników umożliwi wybór optymalnego ukształtowania struktury geometrycznej powierzchni elementu stalowego pod względem minimalizacji oporów tarcia statycznego dla badanych skojarzeń ślizgowych.

METODYKA I PRZEDMIOT BADAŃ

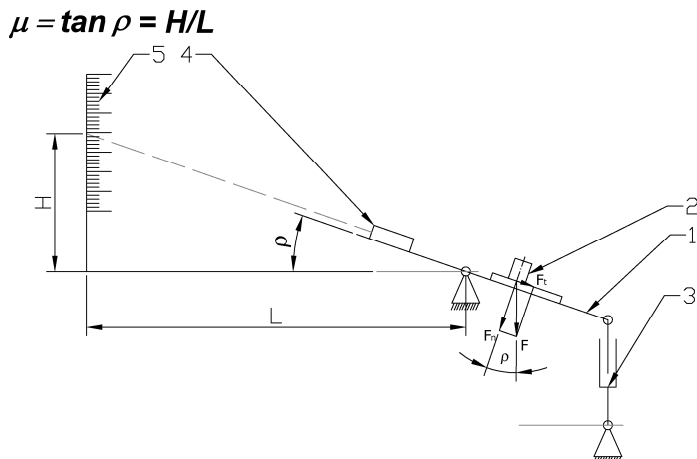
Badania współczynnika tarcia statycznego przeprowadzono dla wybranych par ślizgowych polimer–stal przy ustalonym nacisku jednostkowym $p = 1$ MPa i temperaturze otoczenia $T_o = 22^\circ\text{C}$. Jest to przeciętna wartość średniego nacisku występująca w tego typu skojarzeniach ślizgowych. Do badań wybrano materiały polimerowe, które są najczęściej wykorzystywane w ślizgowych węzłach maszyn, tj.:

- poliamid – PA 6,
- poliacetal – POM,
- politetrafluoroetylen – PTFE,
- kompozyt na osnowie PTFE – PTFE TB40 (PTFE + 40% wag. proszku brązu).

Polimerowe próbki w postaci sworznia o średnicy 8 mm były wcześniej docierane na stanowisku typu „pin-on disk” przy nacisku jednostkowym $p = 1$ MPa i prędkości ślizgania $v = 1$ m/s tak, aby została wytworzona zmodyfikowana warstwa wierzchnia, jaka występuje podczas normalnej eksploatacji ślizgowych elementów maszyn wytworzonych z materiałów polimerowych.

Stanowisko, na którym przeprowadzono badania współczynnika tarcia statycznego, wykorzystuje również pochyłą o regulowanym kącie nachylenia ρ , po której zsuwa się badana próbka obciążona siłą F pochodzącą od zawieszanej dodatkowej masy. Schemat jego działania przedstawiono na **Rys. 1**. Procedura pomiarowa polegała na dowolnym jedno-

stajnym pochylaniu ($\omega = 0,0065 \text{ s}^{-1}$) pary trącej umiejscowionej na wychylnym ramieniu do chwili, w której nastąpi ruch próbki po stalowym przeciwielemencie. W tym momencie rejestrowano tangens kąta pochylenia ρ_0 . Zgodnie z podstawowymi zależnościami pomiędzy siłami występującymi na równi pochyłej, kąt pochylenia ρ_0 odpowiada kątowi tarcia, a zatem tangens tego kąta odpowiadał wartości współczynnika tarcia statycznego μ_0 [L. 1, 2]. Badania wszystkich wybranych par ślizgowych prowadzono w podobnych warunkach procesu tarcia, tj. średni nacisk jednostkowy wynosił $p_{sr} \approx 1,0 \text{ MPa}$, temperatura otoczenia $T_0 = 22^\circ\text{C}$, a czas obciążenia próbki przed pomiarem wynosił do 1 minuty. Przeciwelementy, z którymi współpracowały ślizgowo materiały polimerowe wykonano ze stali C45 w stanie znormalizowanym (twardość $190 \pm 10 \text{ HB}$).



Rys. 1. Schemat ogólny stanowiska do badania współczynnika tarcia statycznego: 1 – wychylne ramię, 2 – para ślizgowa, 3 – siłownik elektryczny, 4 – wskaźnik laserowy, 5 – listwa z podziałką

Fig. 1. Main idea chart of static friction test apparatus: 1 – tilting bar, 2 – friction couple, 3 – electrical actuator, 4 – laser indicator, 5 – scale

WYNIKI BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Na pierwszym etapie badań analizowano wpływ chropowatości powierzchni stalowego przeciwielementu określonej parametrem R_a na wartość współczynnika tarcia statycznego badanych par ślizgowych. Wartość tego parametru, mierzona prostopadle do kierunku śladów obróbki, została ustalona na pięciu poziomach ($R_a = 0,08; 0,4; 0,7; 1,4; 2 \mu\text{m}$). Odpowiednią chropowatość uzyskano szlifując powierzchnię przeciwielementu

różnymi papierami ściernymi. W drugiej części badań określono wpływ kąta β pomiędzy kierunkiem ślizgania a kierunkiem śladów obróbki na powierzchni przeciwelementu na wartość współczynnika tarcia statycznego badanych par ślizgowych. Badania prowadzono dla ustalonej wartości parametru $R_a \approx 0,7 \mu\text{m}$. Dla każdego doświadczenia składającego się z serii pomiarów w ustalonych warunkach tarcia statycznego określony został przedział ufności uzyskanych wyników dla współczynnika ufności $1-\alpha = 0,95$. Wyniki przedstawiono w **Tab. 1** i **2** oraz na wykresach (**Rys. 2** i **3**).

Tabela 1. Współczynnik tarcia statycznego μ_0 oraz przedziały ufności jego wartości ($1-\alpha = 0,95$) materiałów polimerowych w zależności od chropowatości powierzchni współpracujących elementów stalowych ($\beta = 0$ – ślady obróbki równoległe do kierunku tarcia)

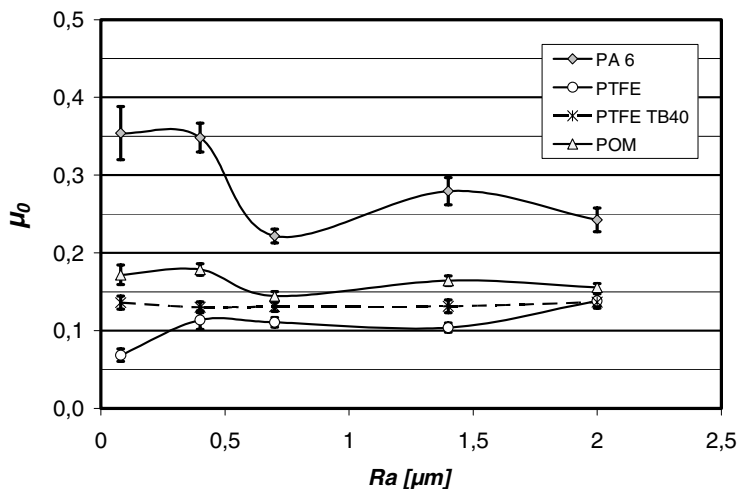
Table 1. The influence of roughness parameter R_a of steel counterface on the static coefficient of friction μ_0 of polymer materials sliding against steel ($\beta = 0$ – lay direction parallel to slide direction)

Ra [μm]	Materiał polimerowy			
	PA 6	POM	PTFE	PTFE TB40
0,08	0,354 $\pm 0,034$	0,172 $\pm 0,013$	0,068 $\pm 0,008$	0,136 $\pm 0,008$
0,4	0,348 $\pm 0,019$	0,179 $\pm 0,007$	0,114 $\pm 0,012$	0,130 $\pm 0,007$
0,7	0,222 $\pm 0,009$	0,144 $\pm 0,006$	0,111 $\pm 0,006$	0,131 $\pm 0,006$
1,4	0,279 $\pm 0,018$	0,164 $\pm 0,006$	0,104 $\pm 0,006$	0,131 $\pm 0,008$
2	0,243 $\pm 0,015$	0,156 $\pm 0,005$	0,138 $\pm 0,009$	0,136 $\pm 0,005$

Tabela 2. Współczynnik tarcia statycznego μ_0 oraz przedziały ufności jego wartości ($1-\alpha = 0,95$) materiałów polimerowych w zależności od kierunku śladów obróbki powierzchni współpracujących elementów stalowych ($R_a \approx 0,7 \mu\text{m}$)

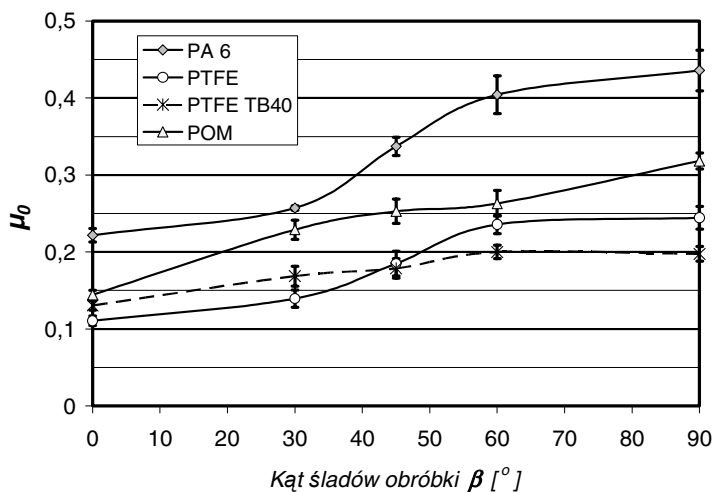
Table 2. The influence of angle β between texture surface direction and sliding direction on the static coefficient of friction μ_0 of polymer materials sliding against steel ($R_a \approx 0,7 \mu\text{m}$)

Kąt śladów obróbki β [$^\circ$]	Materiał polimerowy			
	PA 6	POM	PTFE	PTFE TB40
0	0,222 $\pm 0,009$	0,144 $\pm 0,006$	0,111 $\pm 0,006$	0,131 $\pm 0,006$
30	0,257 $\pm 0,003$	0,229 $\pm 0,012$	0,139 $\pm 0,011$	0,169 $\pm 0,013$
45	0,337 $\pm 0,012$	0,253 $\pm 0,016$	0,185 $\pm 0,016$	0,179 $\pm 0,013$
60	0,404 $\pm 0,025$	0,263 $\pm 0,017$	0,236 $\pm 0,012$	0,200 $\pm 0,009$
90	0,436 $\pm 0,026$	0,318 $\pm 0,010$	0,244 $\pm 0,015$	0,198 $\pm 0,010$



Rys. 2. Współczynnik tarcia statycznego μ_0 w zależności od parametru chropowości Ra powierzchni elementu stalowego ($p = 1$ MPa, $T_o = 22^\circ\text{C}$, $\beta = 0$)

Fig. 2. The influence of roughness parameter Ra of steel counterface on the static coefficient of friction μ_0 ($p = 1$ MPa, $T_o = 22^\circ\text{C}$, $\beta = 0$)



Rys. 3. Współczynnik tarcia statycznego μ_0 w zależności od kąta β śladów obróbki powierzchni elementu stalowego względem kierunku tarcia ($Ra \approx 0,7$ μm, $p = 1$ MPa, $T_o = 22^\circ\text{C}$)

Fig. 3. The influence of angle β between texture surface direction and sliding direction on the static coefficient of friction ($Ra \approx 0,7$ μm, $p = 1$ MPa, $T_o = 22^\circ\text{C}$)

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały istotny wpływ zarówno chropowatości powierzchni, jak i kierunku śladów obróbki względem kierunku ślizgania na wartość współczynnika tarcia statycznego badanych materiałów polimerowych. Uzyskane wyniki umożliwiają wyciągnięcie następujących wniosków i spostrzeżeń:

- Współczynnik tarcia statycznego rośnie wraz z zwiększaniem kąta β śladów obróbki względem kierunku tarcia. Wynika to przede wszystkim ze zwiększającego się wraz z kątem β udziału mechanicznych oddziaływań mikronierówności powierzchni elementu stalowego, które zwiększają siłę tarcia i utrudniają ślizganie elementu polimerowego. Najmniejszą wartość współczynnika tarcia statycznego uzyskano dla kąta $\beta = 0^\circ$, czyli gdy ślady obróbki były równoległe do kierunku ślizgania.
- Dla materiałów polimerowych o większej twardości (PA, POM) opory tarcia statycznego są mniejsze, gdy chropowatość powierzchni przeciwelementu stalowego R_a wynosi powyżej $0,5 \mu\text{m}$. Dla materiałów na osnowie PTFE najkorzystniejsza ze względu na opory tarcia podczas rozruchu jest chropowatość poniżej $0,2 \mu\text{m}$. Przyczyna zaobserwowanej różnicy pomiędzy badanymi materiałami polimerowymi wynika przede wszystkim z różnej twardości badanych materiałów. Pod wpływem obciążenia normalnego powierzchnia ślizgowa materiałów miękkich (np. PTFE) lepiej „dopasowuje się” do powierzchni współpracującego elementu stalowego niż powierzchnia materiałów o większej twardości (PA, POM). Dzięki temu wpływ oddziaływań mechanicznych mikronierówności powierzchni stali w przypadku materiałów polimerowych twardszych jest mniej widoczny niż w przypadku materiałów miękkich (np. PTFE).
- Najmniejszą wrażliwość na zmianę chropowatości oraz kierunku śladów obróbki zaobserwowano dla materiału kompozytowego na osnowie PTFE. Wynika to stąd, że na etapie przygotowania do badań próbek z tego materiału wytworzyła się na jego powierzchni ślizgowej cienka warstewka zawierająca znaczne ilości rozmazanych ziaren proszku brązu [L. 5]. Warstewka ta umocniła warstwę wierzchnią kompozytu i w rezultacie obniżała mechaniczne oddziaływanie mikronierówności powierzchni współpracującego elementu stalowego.

LITERATURA

1. Bushan B., Modern tribology handbook. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2001.
2. Lawrowski Z.: Tribologia – tarcie, zużywanie i smarowanie. PWN, Warszawa 1993.
3. Rymuza Z. Tribology of polymers. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. VII, No. 4, 2007, s. 177–184.
4. Wieleba W.: The statistical correlation of coefficient of friction and wear rate of PTFE composites with steel counterface roughness and hardness. Wear, 2002, Vol. 252, s. 719–729.
5. Wieleba W.: Analiza procesów tribologicznych zachodzących podczas współpracy kompozytów PTFE ze stalą. Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2002.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008–2010 jako projekt badawczy nr N504 405735.

Recenzent:
Stanisław KRAWIEC

Summary

A high static friction coefficient means that the static friction resistance plays an important role in the energy consumption during the start-up period. The minimisation of static frictional resistance is an important issue in polymer-metal sliding couples operating under dry friction conditions.

There have been four typical polymer sliding materials chosen:

- polyamide (PA 6),
- polyoxymethylene (POM),
- polytetrafluoroethylene (PTFE), and
- composite based on PTFE (PTFE + 40 weight % of bronze powder).

Depending on the variant of surface roughness and the texture direction of steel counterface, differences in the static friction of polymer material can be observed.

Test results show the significant influence of surface geometrical structure (roughness, texture direction) of the steel counterface on the value of the static friction coefficient of polymer materials sliding against steel.