

**Wojciech WIELEBA^{*}, Dymitry CAPANIDIS^{*},
Jarosław ŻELISZEWSKI^{*}**

WPLYW WYBRANYCH NAPEŁNIACZY STOSOWANYCH W KOMPOZYTACH PTFE NA WSPÓLCZYNNIK TARCIA STATYCZNEGO PO STALI

**EFFECT OF SELECTED FILLERS ON THE COEFFICIENT
OF STATIC FRICTION OF PTFE BASED COMPOSITES ON
STEEL**

Słowa kluczowe:

tarcie statyczne, kompozyty PTFE

Key words:

PTFE based composite, static friction

Streszczenie

Tarcie statyczne odgrywa istotną rolę przy wyznaczaniu podczas projektowania całkowitych oporów ruchu elementów maszyn pracujących cyklicznie, zwłaszcza tych, które realizują ruch posuwisto-zwrotny. Straty

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

tarcia w tego typu elementach mogą znacznie obniżyć sprawność całego urządzenia podczas rozruchu. Można do nich zaliczyć między innymi uszczelnienia techniczne pracujące w ruchu posuwisto-zwrotnym oraz łożyska ślizgowe pracujące okresowo. Ślizgowe elementy maszyn, również pracujące cyklicznie, często wytwarzane są z materiałów polimerowych, które umożliwiają ich pracę praktycznie bez smarowania.

Badania tribologiczne wybranych par ślizgowych przeprowadzono na stanowisku do badania tarcia statycznego. Wybranymi materiałami były kompozyty polimerowe na osnowie politetrafluoroetyleny (PTFE) zawierające jako napełniacze proszek brązu, grafit oraz włókna szklane. Kompozyty te współpracowały ze stalą C45 w warunkach tarcia suchego. Wyniki badań wykazały istotny wpływ napełniaczy na wartość współczynnika tarcia statycznego. Najwyższą wartość współczynnika tarcia zaobserwowano dla kompozytów zawierających proszek brązu, a najniższą dla kompozytów zawierających grafit. Zwiększenie zawartości napełniacza w kompozycie PTFE prowadzi do wzrostu wartości współczynnika tarcia statycznego. Adhezja napełniaczy (proszek brązu, grafitu) do stali, a także ich oddziaływania mechaniczne (włókno szklane) odgrywają ważną rolę w oporach tarcia statycznego.

WPROWADZENIE

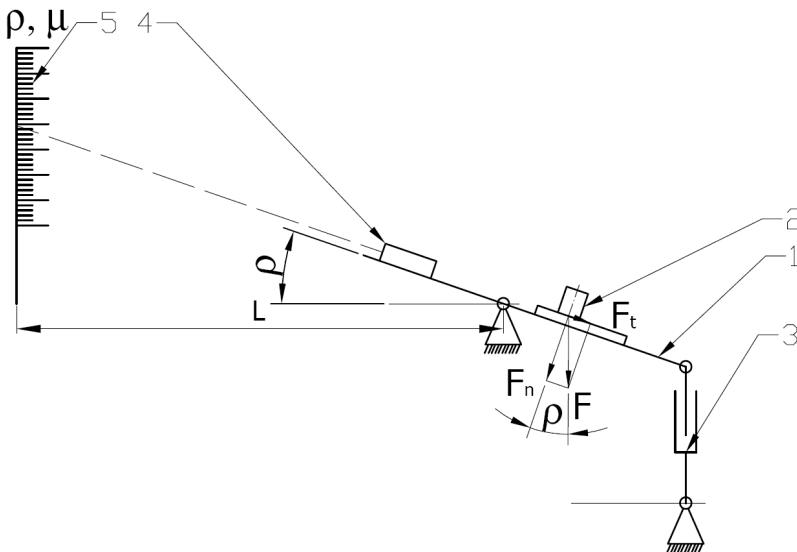
Tarcie statyczne odgrywa istotną rolę w wyznaczaniu oporów podczas rozruchu elementów maszyn pracujących cyklicznie. Do tego typu elementów można zaliczyć między innymi łożyska ślizgowe pracujące okresowo oraz uszczelnienia techniczne pracujące w ruchu posuwisto-zwrotnym. Większość opracowań dotyczących tribologii polimerów opisuje przede wszystkim proces tarcia kinetycznego [L. 2, 9, 10, 12]. W publikacjach dotyczących tarcia statycznego materiałów polimerowych prezentowane są przede wszystkim wyniki badań doświadczalnych [L. 1, 5, 13] lub rzadziej jego modelowanie [L. 3, 5], przy czym publikacje te dotyczą najczęściej tarcia statycznego materiałów elastomerowych.

Polimerowe elementy ślizgowe maszyn wytwarzane się są między innymi z kompozytów na osnowie politetrafluoroetyleny (PTFE). Materiały te stosowane są zwłaszcza tam, gdzie smarowanie węzłów ślizgowych jest niewystarczające lub wręcz niemożliwe. PTFE jest znany jako materiał o bardzo dużej odporności chemicznej, niewielkiej adhezji do innych materiałów oraz, co się z tym wiąże, małych wartości współczyn-

nika tarcia statycznego. W postaci niemodyfikowanej (czystej) jest on rzadko stosowany ze względu na bardzo małą odporność na zużywanie tribologiczne, a także na nie najlepsze własności mechaniczne. Wytworzenie na jego osnowie materiałów kompozytowych ma na celu zminimalizowanie wymienionych wad. Wprowadzone do osnowy napełniacze, zwłaszcza znajdujące się w warstwie wierzchniej, mogą jednak zmienić adhezję pomiędzy materiałem kompozytowym a współpracującym ślizgowo materiałem metalicznym, wpływając tym samym na proces tarcia. Dodatkowo przy wyborze kompozytu pod kątem jak najmniejszych oporów tarcia podczas rozruchu niezbędna jest znajomość wpływu poszczególnych składników kompozytu na wartości współczynnika tarcia statycznego, co było celem prezentowanego opracowania.

BADANIA WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA STATYCZNEGO

Badania tarcia statycznego przeprowadzono na stanowisku badawczym, którego schemat przedstawiono na **Rysunku 1**, a jego dokładniejszy opis zamieszczono w publikacji [L. 6]. Ogólna zasada działania stanowiska



Rys. 1. Schemat kinematyczny stanowiska do badania tarcia statycznego [6]: (1 – wychylne ramię, 2 – para ślizgowa, 3 – siłownik elektryczny, 4 – wskaźnik laserowy, 5 – listwa z podziałką)

Fig. 1. Kinematics scheme of the test rig for research of static friction: (1 – tilting bar, 2 – friction couple, 3 – electrical actuator, 4 – laser indicator, 5 – scale)

do badania tarcia statycznego opiera się na wyznaczeniu tangensa kąta pochylenia równi ρ_0 [L. 3, 7], przy którym rozpoczął się względny ruch pomiędzy próbką badanego materiału a przeciwpróbką zamontowaną na wychylnym ramieniu równi. Procedura pomiarowa polegała na obciążeniu próbki zewnętrzną siłą F za pomocą obciążników tak, aby w obszarze styku występował założony wstępny nacisk jednostkowy p . Po określonym czasie działania obciążenia t_p następowało powolne jednostajne pochylenie ($\omega = 0,0065 \text{ s}^{-1}$) pary trącej umiejscowionej na wychylnym ramieniu do chwili, w której wystąpił ruch próbki po metalowym przeciwielemencie. W tym momencie rejestrowano tangens kąta pochylenia ramienia ρ_0 . Zgodnie z podstawowymi zależnościami pomiędzy siłami występującymi na równi pochyłej, kątem pochylenia ρ_0 odpowiada kątowi tarcia, zatem tangens tego kąta odpowiadał wartości współczynnika tarcia statycznego $\mu_0 = \tan \rho_0$ [L. 3, 7].

Badanymi materiałami polimerowymi były kompozyty na osnowie politetrafluoroetyleny (PTFE) zawierające następujące napełniacze:

- proszek brązu cynowego o wielkości ziarna do $60 \mu\text{m}$ (w ilości do 30% obj.),
- włókno szklane cięte (w ilości do 30% obj.),
- grafit cejloński (w ilości do 30% obj.).

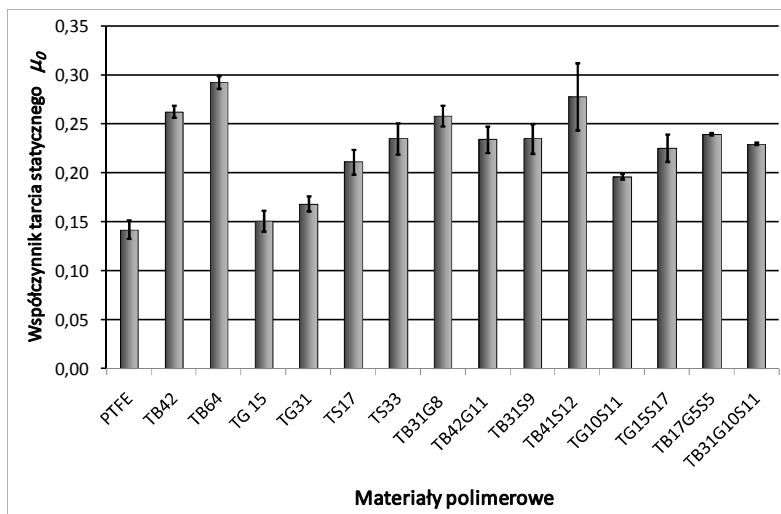
Składy poszczególnych kompozytów opracowano, wykorzystując plan sympleksowy [L. 4]. Zestawienie opracowanych materiałów kompozytowych przedstawiono w **Tabeli 1**. Polimerowe próbki z badanych kompozytów w kształcie sworznia o średnicy 8 mm wykonano z półfabrykatów w postaci tulei metodą obróbki skrawaniem. Podczas badań próbki współpracowały z przeciwielementami wykonanymi ze stali C45 o twardości 40 HRC i chropowatości powierzchni o parametrze $R_a = 0,26 \mu\text{m}$. Przed pomiarami każdą polimerową próbkę docierano na tribotesterze typu „pin-on-disk” tak, aby została wytworzona eksploatacyjna warstwa wierzchnia. Docieranie odbywało się przy podobnym obciążeniu (nacisku jednostkowym), w jakim następnie prowadzono pomiary współczynnika tarcia statycznego.

Wyniki badań, tj. wartości średnie współczynnika tarcia statycznego uzyskane z serii pomiarów, a także przedziały ufności określone na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ przedstawiono w **Tabeli 1** oraz w formie wykresu na **Rysunku 2**.

Tabela 1. Wyniki badań współczynnika tarcia statycznego dla kompozytów PTFE współpracujących ze stalą ($p \approx 1,0$ MPa, $T_o = 24^\circ\text{C}$, czas spoczynku pod obciążeniem $t_{sp} = 60$ s)

Table 1. Static friction coefficient of PTFE composites on steel in dry friction conditions ($p \approx 1,0$ MPa, $T_o = 24^\circ\text{C}$, dwell time under initial load $t_{sp} = 60$ s)

Lp.	Nazwa materiału (oznaczenie)	Udział objętościowy napełniaczy [%]			Współczynnik tarcia statycznego	
		brąz	grafit	włókno szklane	średnia	ufność
1	PTFE	0	0	0	0,142	$\pm 0,010$
2	TB42	15	0	0	0,263	$\pm 0,006$
3	TB64	30	0	0	0,293	$\pm 0,007$
4	TG 15	0	15	0	0,151	$\pm 0,011$
5	TG31	0	30	0	0,168	$\pm 0,008$
6	TS17	0	0	15	0,212	$\pm 0,013$
7	TS33	0	0	30	0,235	$\pm 0,016$
8	TB31G8	10	10	0	0,258	$\pm 0,011$
9	TB42G11	15	15	0	0,234	$\pm 0,013$
10	TB31S9	10	0	10	0,235	$\pm 0,015$
11	TB41S12	15	0	15	0,278	$\pm 0,034$
12	TG10S11	0	10	10	0,197	$\pm 0,003$
13	TG15S17	0	15	15	0,226	$\pm 0,014$
14	TB17G5S5	5	5	5	0,240	$\pm 0,001$
15	TB31G10S11	10	10	10	0,230	$\pm 0,001$



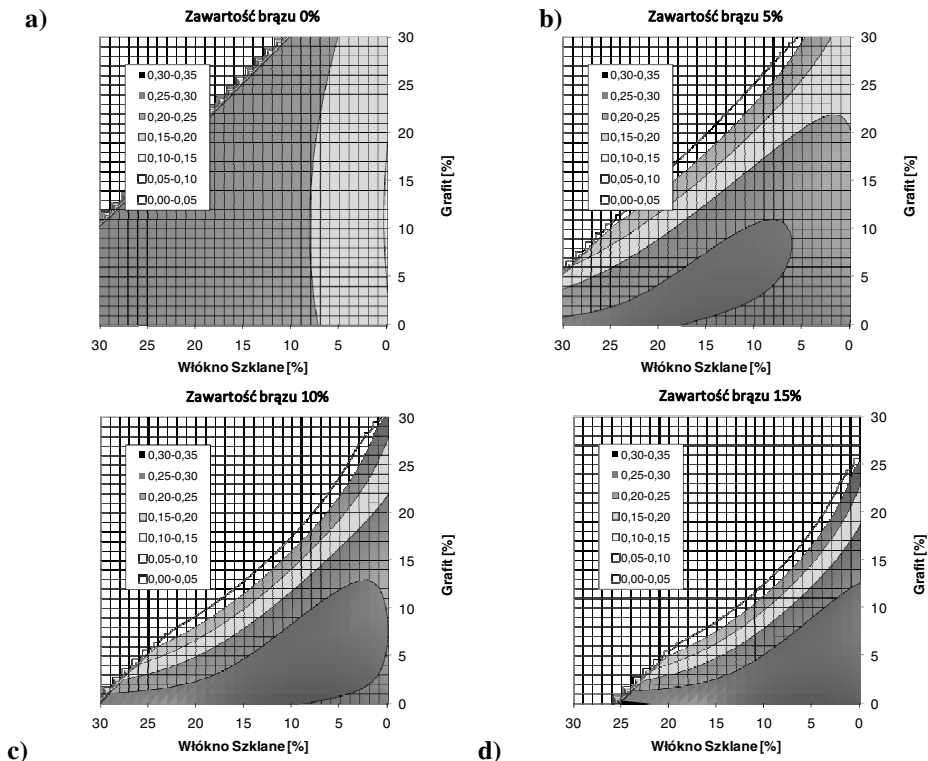
Rys. 2. Współczynnik tarcia statycznego kompozytów PTFE po stali w warunkach tarcia suchego ($p = 1$ MPa, $T_o = 24^\circ\text{C}$)

Fig. 2. Static friction coefficient of PTFE composites on steel in dry friction conditions ($p = 1$ MPa, $T_o = 24^\circ\text{C}$)

Aby określić wpływ poszczególnych napełniaczy, opracowano na podstawie wyników pomiarów funkcję regresji opisującą zależność współczynnika tarcia statycznego od składu badanych kompozytów PTFE. Jako funkcję regresji wybrano wielomian uproszczony zredukowany zalecany do opisywania wyników badań przeprowadzonych z wykorzystaniem metody planu sympleksowego [L. 4]:

$$Y = b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_1X_2 + b_6X_1X_3 + b_7X_1X_4 + b_8X_2X_3 + b_9X_2X_4 + b_{10}X_3X_4 + b_{11}X_1X_2X_3 + b_{12}X_1X_2X_4 + b_{13}X_2X_3X_4 + b_{14}X_1X_2X_3X_4$$

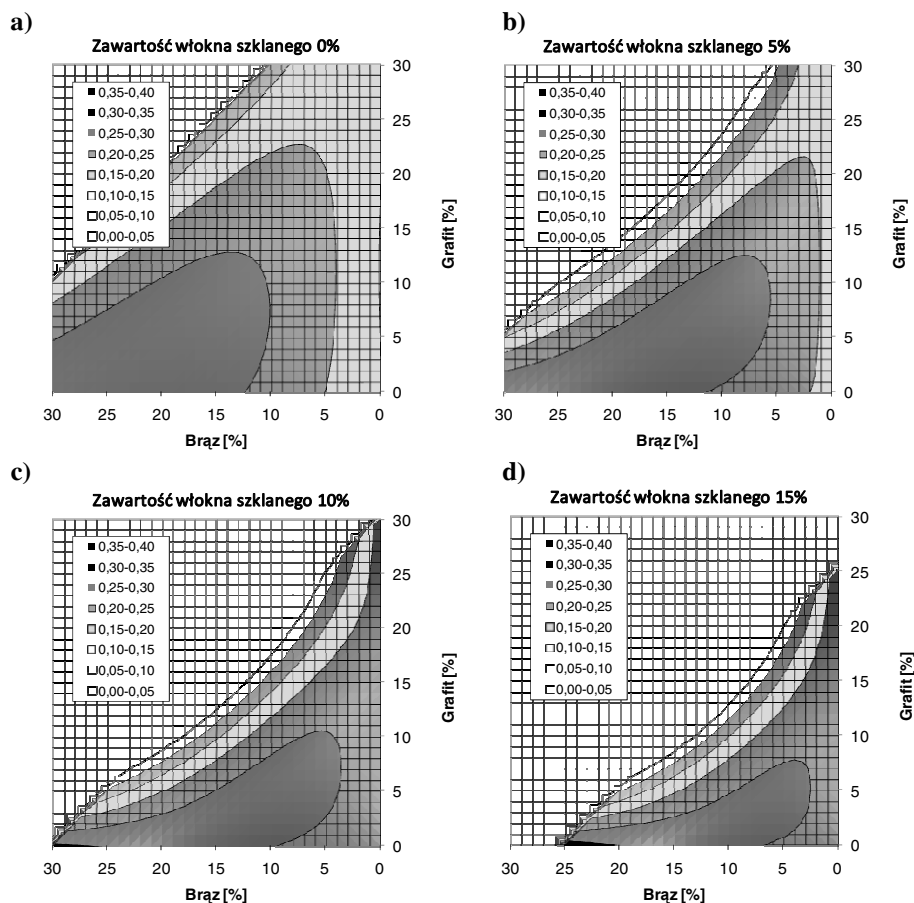
gdzie: b_1, \dots, b_{14} – współczynniki wielomianu, X_1, X_2, X_3, X_4 – udziały objętościowe [%] składników kompozytu (X_1 – PTFE, X_2 – brąz, X_3 – grafit, X_4 – włókno szklane; $\sum X_i = 100\%$).



Rys. 3. Współczynnik tarcia statycznego kompozytów PTFE po stali przy ustalonych zawartościach proszku brązu ($p = 1$ MPa, $T_o = 24^\circ\text{C}$)

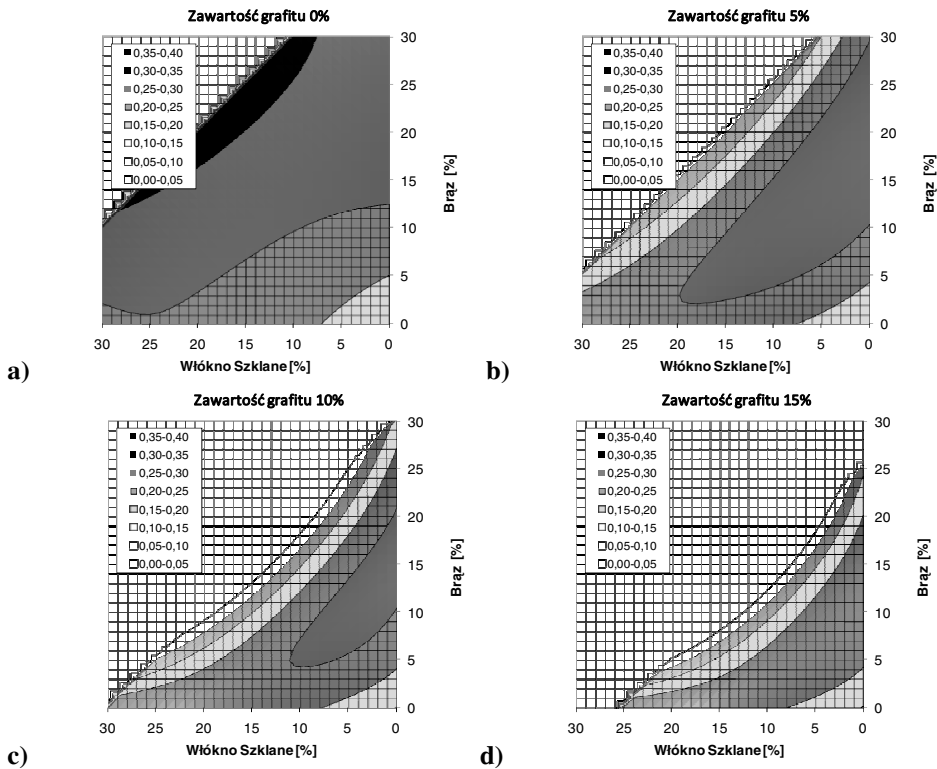
Fig. 3. Static friction coefficient of PTFE composites with fixed content of bronze powder on steel ($p = 1$ MPa, $T_o = 24^\circ\text{C}$)

Współczynniki wielomianu obliczono metodą najmniejszych kwadratów. Następnie przeprowadzono analizę statystyczną funkcji regresji (współczynnik korelacji $R^2 = 0,99997$, test $F = 163,1$), która nie dała podstaw do odrzucenia otrzymanej funkcji jako nieprawidłowo opisującej wyniki pomiarów ($F_{kr} = 8,86$ dla $\alpha = 0,01$). W celu łatwiejszej analizy przebiegu funkcji została ona przedstawiona w postaci wykresów powierzchniowych (dla ustalonej zawartości jednego z napełniaczy) na **Rysunkach 3–5**. Wykresy ograniczono do obszaru, w którym zawartość osnowy (PTFE) w kompozycie wynosi co najmniej 60%. Wynikało to z praktycznych możliwości wytworzenia materiału kompozytowego o jednorodnej strukturze oraz nieposiadającego wad materiałowych.



Rys. 4. Współczynnik tarcia statycznego kompozytów PTFE po stali przy ustalonych zawartościach włókna szklanego ($p = 1$ MPa, $T_o = 24^\circ\text{C}$)

Fig. 4. Static friction coefficient of PTFE composites with fixed content of glass fibre on steel ($p = 1$ MPa, $T_o = 24^\circ\text{C}$)



Rys. 5. Współczynnik tarcia statycznego kompozytów PTFE po stali przy ustalonych zawartościach grafitu ($p = 1 \text{ MPa}$, $T_o = 24^\circ\text{C}$)

Fig. 5. Static friction coefficient of PTFE composites with fixed content of graphite on steel ($p = 1 \text{ MPa}$, $T_o = 24^\circ\text{C}$)

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania potwierdziły wpływ składu kompozytów na osnowie politetrafluoroetylen (PTFE) na ich współczynnik tarcia statycznego po stali. Wyniki badań oraz analiza przebiegu uzyskanej funkcji regresji umożliwiają sformułowanie następujących spostrzeżeń i wniosków:

- Zwiększanie udziału pojedynczych napełniaczy w kompozycie prowadzi do zwiększenia wartości współczynnika tarcia statycznego, przy czym najmniejszy wpływ zaobserwowano w przypadku kompozytów zawierających grafit, natomiast największy dla kompozytów zawierających proszek brązu. Najmniejszą wartość współczynnika tarcia statycznego po stali zaobserwowano dla kompozytu TG15 (PTFE + 15%

grafitu), dla którego $\mu_0 = 0,151$, natomiast największą dla kompozytu TB64 (PTFE + 30% brązu), dla którego $\mu_0 = 0,293$. Przyczyn należy szukać w niewielkiej adhezji grafitu do stali, co przyczyniło się do nieznacznego wzrostu współczynnika tarcia w porównaniu z PTFE nienapełnionym. Z kolei brąz wykazuje dużą adhezję do stali, co przy jednocześnie jego znacznym udziale w eksploatacyjnej warstwie wierzchniej [L. 12] spowodowało zwiększenie wartości współczynnika tarcia statycznego.

- W przypadku kompozytów zawierających włókno szklane przyczyny wzrostu współczynnika tarcia statycznego należy doszukiwać się raczej w oddziaływaniach mechanicznych pomiędzy włóknem szklanym znajdującym się na powierzchni ślizgowej kompozytu a powierzchnią stali. Włókno szklane wykazuje bowiem małą adhezję do stali, jednak jego pokruszone fragmenty znajdujące się w warstwie wierzchniej mogą przyczynić się do zwiększonych oddziaływań mechanicznych pomiędzy współpracującymi powierzchniami kompozytu PTFE i stali.
- Analizując na wykresach przebieg funkcji regresji opisującej zależność współczynnika tarcia statycznego od składu kompozytów, można zauważyć, że największy współczynnik tarcia statycznego po stali występuje dla kompozytów zawierających jednocześnie włókno szklane i proszek brązu (**Rys. 5a**). Z kolei wprowadzenie grafitu do kompozytu zmniejsza współczynnik tarcia. Jest to widoczne zwłaszcza w przypadku kompozytów zawierających oprócz grafitu również brąz oraz włókno szklane (**Rys. 4b, c, d**).

LITERATURA

1. Benabdallah H.S.: Static friction coefficient of some plastics against steel and aluminum under different contact conditions. *Tribology International* 40 (2007), s. 64–73.
2. Briscoe B.J.: A view of polymer composite tribology. *ASM International Conference "Tribology of Composite Materials"*, Oak Ridge, 1990, s. 15–23.
3. Bushan B., *Modern tribology handbook*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2001.
4. Capanidis D., Selected aspects of the methodology of tribological investigations of polymer materials. *Archives of Civil and Mechanical Eng.*, Vol. VII, No. 4, 2007, s. 39–55.
5. Deladi E.L., de Rooij M.B., Schipper D.J.: Modeling of static friction in rubber-metal contact. *Tribology International* 40 (2007), s. 588–594.

6. Kowalewski P., Wieleba W.: Stanowisko do badania współczynnika tarcia statycznego par trących typu: metal–polimer. *Czasopismo Techniczne – PKrak. Mechanika*. 2009, z. 1-M, s. 191–194.
7. Lawrowski Z.: *Tribologia – tarcie, zużywanie i smarowanie*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1993.
8. Persson B.N.J et al. On the nature of the static friction, kinetic friction and creep. *Wear* 254 (2003) 835–851.
9. Rymuza Z.: *Trybologia polimerów*. WNT, Warszawa 1986.
10. Rymuza Z.: Tribology of polymers. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. VII, No. 4, 2007, s. 177–184.
11. Wieleba W.: The mechanism of tribological wear of thermoplastic materials. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. VII, No. 4, 2007, s. 185–199.
12. Wieleba W.: *Analiza procesów tribologicznych zachodzących podczas współpracy kompozytów PTFE ze stalą*. Oficyna Wyd. PWr, Wrocław 2002.
13. Wieleba W.: Wpływ ukształtowania struktury geometrycznej powierzchni stali na współczynnik tarcia statycznego współpracujących materiałów polimerowych. *Tribologia*. 2009, R. 40, nr 5, s. 203–209.

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

Recenzent:
Janusz JANECKI

Summary

Determination of frictional resistance, apart from durability, is a significant issue during the designing of sliding machine elements, especially these that work in reciprocating motion. Friction losses in these elements may cause a significant decrease of the whole system efficiency during the start-up period.

Tribological investigations of selected sliding couples (PTFE composite on metal) in the static friction were carried out on the rig. The material of selected polymeric composites for tribological investigations was based on polytetrafluoroethylene (PTFE). The fillers were made of bronze powder, graphite, and glass fibre. These composites co-operated with steel C45 in dry friction conditions.

Test results demonstrated the significant influence of fillers on the value of the static friction coefficient. The highest value of the coefficient of friction was observed for composites containing bronze powder and the lowest value for the composites containing graphite.

Increasing the filler content in the composite leads to an increase in the value of the coefficient of static friction. Adhesion of fillers (bronze powder, graphite) to steel and their mechanical effects (glass fibre) play an important role in the resistance of static friction.