

**Edyta OSUCH-SŁOMKA\*, Marian GRZYDKOWSKI\***

**WPLYW ZAWARTOŚCI NAPEŁNIACZA  
NA WŁAŚCIWOŚCI TARCIOWE KOMPOZYTÓW  
POLITETRAFLUOROETYLENU**

**INFLUENCE OF FILLERS ON FRICTIONAL PROPERTIES  
OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE (PTFE) COMPOSITES**

**Słowa kluczowe:**

Politetrafluoroetylen, kompozyty polimerowe, tarcie technicznie suche, współczynnik tarcia, zużycie

**Key-words**

Polytetrafluoroethylene, composites, dry friction, friction coefficient, wear

**Streszczenie**

W pracy zbadano wpływ zawartości grafitu, dwusiarczku molibdenu i brązu na właściwości ślizgowe kompozycji PTFE w skojarzeniu tarciovym ze stalą narzędziową NC10. Stwierdzono, że poszczególne napełniacze w złożony, trudny do przewidzenia sposób, wpływają na właściwości tar-

---

\* Instytut Technologii Eksploatacji w radomiu, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (048) 36-442-41.

ciowe kompozytów PTFE: np. zmniejszeniu oporów ruchu może towarzyszyć zwiększone zużycie lub przy różnych oporach ruchu występuje zbliżone zużycie. Tak więc zużycie kompozytów PTFE w układzie tarciovym ze stalą zależy nie tylko od oporów ruchu. Dlatego też należy bardzo ostrożnie podejmować decyzje w sprawie wyboru napełniacza funkcjonalnego dla kompozytów PTFE współpracujących ze stalą, a decyzje każdorazowo weryfikować eksperymentalnie.

## WPROWADZENIE

W budowie uszczelnień i łożysk ślizgowych powszechnie jest stosowany politetrafluoroetylen (PTFE) i kompozyty wytwarzane na jego bazie. Fazę zdyspergowaną w tych kompozytach stanowią smary stałe [L. 1, 2] takie jak grafit i dwusiarczek molibdenu ( $\text{MoS}_2$ ) oraz materiały dobrze przewodzące ciepło, np. brąz. Badania [L. 3] wykazały, że zużycie kompozytów PTFE napełnionych brązem, grafitem lub  $\text{MoS}_2$  w skojarzeniu tribologicznym ze stalą, nie jest zależne od oporów ruchu. Szczegółowe badania [L. 4] oporów ruchu i zużycia kompozytów zawierających wieloskładnikowe kompozycje napełniaczy w PTFE nie wykazało zależności pomiędzy cechami materiałowymi kompozytu a jego właściwościami tarciovymi w suchym kontakcie ze stalą.

Celem pracy było zbadanie wpływu zawartości grafitu,  $\text{MoS}_2$ , i brązu na właściwości ślizgowe binarnych i wieloskładnikowych kompozycji wytworzonych na bazie Tarflenu w skojarzeniu tribologicznym ze stalą narzędziową NC10.

## METODYKA BADAŃ

Testy tribologiczne prowadzono w węźle tarcia o strukturze pierścień-tarcza (stal/kompozyt PTFE), przy liniowej prędkości ślizgania  $v = 0,2$  m/s, nacisku jednostkowym  $p_j = 0,23$  N/mm<sup>2</sup>, w warunkach tarcia technicznie suchego w czasie 1800 s, co odpowiadało drodze 360 m. Wilgotność powietrza podczas testów wynosiła 50–60%, a temperatura otoczenia  $23 \pm 3$  °C. Próbkę kompozytów przygotowano zgodnie z metodyką przedstawioną w [L. 3, 5] stosując PTFE, wytwarzany metodą suspensyjną w Zakładach Azotowych Tarnów-Mościce S.A. pod nazwą Tarflenä (proszek M1 o rozmiarach cząstek 50–100  $\mu\text{m}$ ). W roli napełniaczy funkcjonalnych używano brązu B10 o rozmiarze ziaren 30–40  $\mu\text{m}$  wytwarzany w Zakładach Me-

talurgicznych w Trzebini, grafit syntetyczny o ziarnach 40–50 mm (Zakłady Elektrod Węglowych w Raciborzu) oraz syntetyczny MoS<sub>2</sub> o symbolu BDH 29268.4 L01 i uziarnieniu ~10 mm produkcji Merck KGaA. Składy ilościowe próbek do badań ustalono na podstawie obliczeń optymalizacyjnych dla odporności na zużywanie za pomocą testu ortogonalnego PS/DS-P [L. 6, 7] przy założonym modelu matematycznym nieliniowej funkcji regresji w postaci wielomianu drugiego stopnia i zakresie zmienności czynników niezależnych: zawartość brązu – 1–40%, grafitu – 1–20%, MoS<sub>2</sub> – 0,5–4,0%.

## WYNIKI BADAŃ

Skład próbek kompozytowych stosowanych w badaniach oraz średnią chropowatość ich powierzchni przedstawiono w **Tabeli 1**. Jak wynika z danych tej tabeli, bezwzględne wielkości charakteryzujące chropowatości powierzchni wszystkich kompozytów przyjmują stosunkowo niskie wartości. Jednak pomimo identycznych warunków szlifowania i polerowania wszystkich próbek, względne różnice chropowatości poszczególnych kompozytów przekraczały wielkość 2. Również w przypadku kompozytów zawierających smar stały (grafit lub MoS<sub>2</sub>) brak jest korelacji pomiędzy jego zawartością w PTFE a chropowatością. Jedynie w przypadku kompozytu zawierającego najtwardszy ze stosowanych napelniczy – brąz – obserwuje się wzrost chropowatości powierzchni w miarę zwiększania udziału napelnicza w PTFE. W przypadku kompozytu wieloskładnikowego występują następujące zależności: kompozyty zawierające najmniejsze ilości napelniczy (4,5% brązu, 2,7% grafitu, 0,8% MoS<sub>2</sub>) wykazują najniższą chropowatość powierzchni; chropowatość kompozytów zawierających brąz rośnie wraz z jego ilością w PTFE niezależnie od udziału innych napelniczy.

Na **Rys. 1a–d** przedstawiono charakterystyczne (zaobserwowane) zależności oporów ruchu od drogi tarcia binarnych i wieloskładnikowych materiałów kompozytowych PTFE współpracujących ze stalą. Zmiana oporów ruchu w funkcji drogi odzwierciedla zmiany warunków tarcia, które zależą głównie od interakcji zachodzących w styku stal-polimer, komplikowanych dodatkowo obecnością napelnicza w strefie tarcia. Dane przedstawione na tych rysunkach wykazują, że poszczególne napelnicze różnie kształtują opory ruchu w systemie tribologicznym stal/kompozyt PTFE.

Zmiany wartości siły tarcia w funkcji drogi dla układu stal/PTFE (czyści) zaprezentowane na **Rys. 1a** można interpretować następująco:

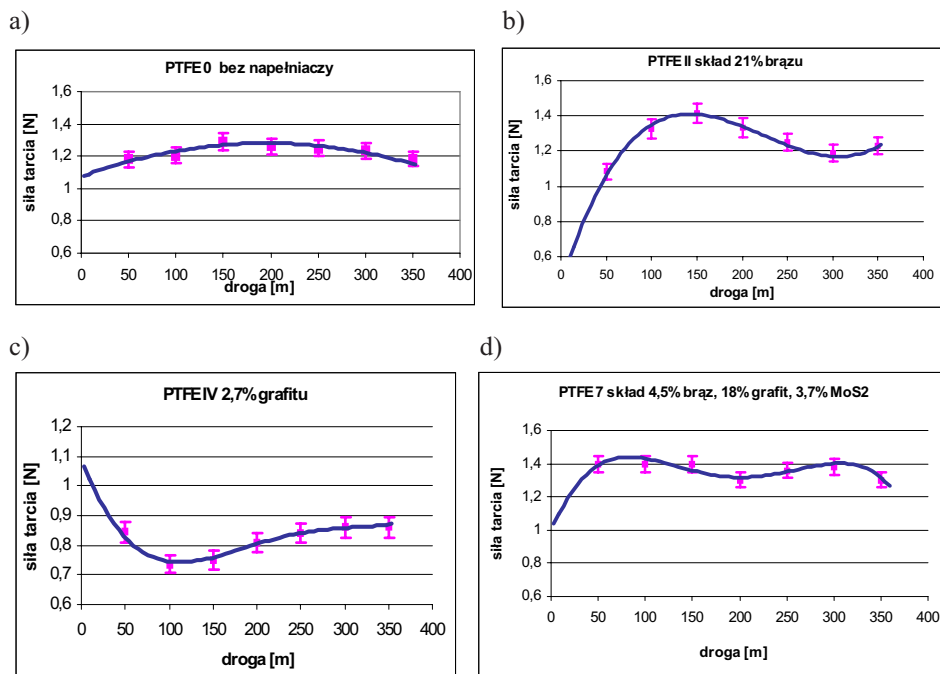
Tabela 1. Skład binarnych i wieloskładnikowych kompozytów PTFE oraz średnia chropowatość próbek używanych w badaniach właściwości tribologicznych

Symbol próbki	Skład kompozytu PTFE, udział masowy [%]				Chropowatość, [ $\mu\text{m}$ ] $R_a$
	PTFE	Brąz	Grafit	MoS <sub>2</sub>	
PTFE 0	100	–	–	–	0,218
PTFE I	95,5	4,5	–	–	0,090
PTFE II	79,0	21,0	–	–	0,167
PTFE III	63,5	36,5	–	–	0,267
PTFE IV	97,3	–	2,7	–	0,117
PTFE V	89,5	–	10,5	–	0,223
PTFE VI	82,0	–	18,0	–	0,115
PTFE VII	99,5	–	–	0,5	0,060
PTFE VIII	97,8	–	–	2,2	0,180
PTFE IX	96,0	–	–	4,0	0,073
PTFE 1	92	4,5	2,7	0,8	0,177
PTFE 2	60	36,5	2,7	0,8	0,437
PTFE 3	76,7	4,5	18,0	0,8	0,247
PTFE 4	44,7	36,5	18,0	0,8	0,237
PTFE 5	89,1	4,5	2,7	3,7	0,223
PTFE 6	57,1	36,5	2,7	3,7	0,293
PTFE 7	73,8	4,5	18,0	3,7	0,293
PTFE 8	41,8	36,5	18,0	3,7	0,347
PTFE 9	66,3	21,0	10,5	2,2	0,273
PTFE 10	47,3	40,0	10,5	2,2	0,323
PTFE 11	75,8	21,0	1,0	2,2	0,230
PTFE 12	68,0	21,0	10,5	0,5	0,277
PTFE 13	64,5	21,0	10,5	4,0	0,247

- początkowy wzrost oporów ruchu jest prawdopodobnie związany z „dopasowywaniem się – wygładzaniem” powierzchni kompozytu co prowadzi do przyrostu pola powierzchni kontaktu i związanego z tym, wzrostu siły oddziaływań międzyfazowych, a także rozwoju liczby szczepień adhezyjnych. Polimer jest stopniowo przenoszony na powierzchnię stali (adhezyjne niszczenie powierzchniowych warstw próbki PTFE i ich ciągłe odnawianie, a powierzchnia stali stopniowo pokrywa się warstwą polimery). W trakcie tarcia zachodzi przenoszenie i namazywanie PTFE na powierzchnię stali;

- po około 200 m ustala się stan równowagi w węzle tarcia. Materiał polimerowy jest „płynnie” wymieniany pomiędzy współpracującymi powierzchniami polimer–polimer/stal. Przekształcenie warstw wierzchnich obu powierzchni w wyniku „samoorganizacji” systemu tribologicznego prowadzi do powolnego spadku oporów ruchu.

Ogólnie rzecz ujmując, analiza danych przedstawionych na **Rys. 1 a), b), c), d)** pozwala stwierdzić, że rodzaj napełniacza PTFE wpływa na wielkość oporów ruchu w kontakcie tarciovym stal/kompozyt PTFE oraz na

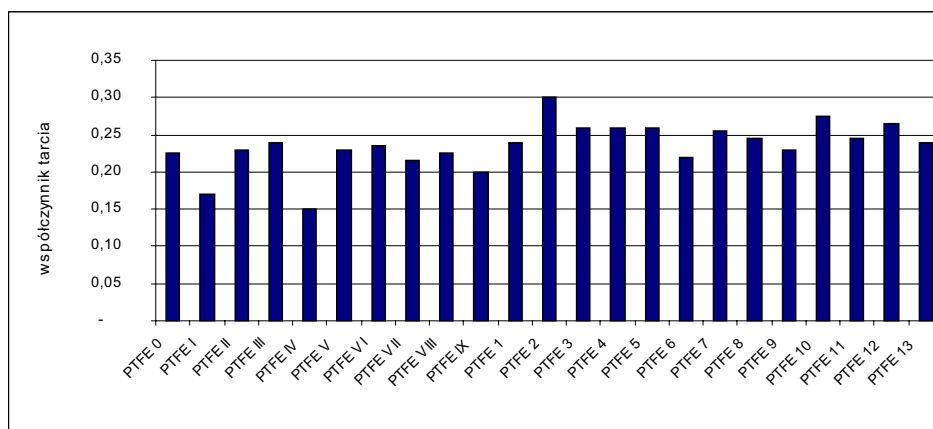


**Rys. 1. Zależność siły tarcia od drogi w układzie tarciovym stal/PTFE: a) PTFE 0 baza, b) PTFE II – 21% brązu, c) PTFE IV – 2,7% grafitu, d) PTFE 7 – 4,5% brązu, 18% grafitu, 3,7%  $\text{MoS}_2$**

Fig. 1. Dependence of frictional force in the contact with steel/PTFE: a) PTFE 0, b) PTFE II with 21% bronze, c) PTFE IV with 2,7% graphite, d) PTFE 7 with 4,5% bronze, 18% graphite, 3,7%  $\text{MoS}_2$

charakter ich zmian w funkcji drogi tarcia. W niektórych przypadkach następuje wzrost oporów ruchu w miarę przyrostu drogi tarcia, w innych spadek. Znaczne zmiany oporów ruchu w funkcji drogi tarcia układów stal/PTFE z różnymi napełniaczami utrudniają wyznaczenie i porównanie

chwilowych (brak kryteriów wyboru) wartości współczynników tarcia dla poszczególnych układów materiałowych. Dlatego też dla porównania właściwości tarciovych poszczególnych kompozytów wyznaczano średnie wartości współczynników tarcia dla drogi 360 m (**Rys. 2**) i masowe zużycie próbki kompozytu PTFE po tarcu na drodze 360 m (**Tab. 2**).



**Rys. 2.** Średnie wartości współczynnika tarcia dla układów tarciovych stal/kompozyt PTFE

**Fig. 2.** Average of friction coefficient of configuration: steel/PTFE composites

Współczynniki tarcia w „suchym” kontakcie ze stalą dla większości badanych kompozytów binarnych mieszczą się w zakresie  $0,2 \div 0,24$ . Jedynie w dwóch przypadkach były one wyraźnie niższe, zbliżone do wartości współczynników tarcia [L. 8]. Dotyczyło to kompozytów zawierających 2,7% grafitu (PTFE IV) oraz 4,5% brązu (PTFE I), a więc napelniaczy spełniających odmienne funkcje w kompozycie. Ogólnie dla kompozytów binarnych można stwierdzić następujące tendencje: im większa zawartość brązu w PTFE, tym współczynnik tarcia w kontakcie ze stalą większy (PTFE I, III), ze wzrostem udziału grafitu rośnie współczynnik tarcia (PTFE IV÷VI), zmianie zawartości  $\text{MoS}_2$  w PTFE nie towarzyszy adekwatna zmiana współczynnika tarcia (PTFE VII÷IX).

Wieloskładnikowe kompozyty PTFE wykazywały z reguły wyższe współczynniki tarcia w kontakcie ze stalą niż kompozyty binarne - podobne spostrzeżenia występują w pracy [L. 8] uzyskane współczynniki tarcia dla binarnych kompozytów wynosiły 0,12, 0,15, 0,17, a dla złożonych kom-

pozytów 0,24, 0,25, 0,3 – ich wartość oscylowała w pobliżu 0,25 lub nieco powyżej. Stosunkowo najniższe współczynniki tarcia wykazywały próbki PTFE 1, PTFE 6, PTFE 9 (0,20÷0,23). W tej grupie znajdują się kompozyty o niskiej (PTFE 1) jak i wysokiej (PTFE 6) łącznej zawartości napełniacza. Najwyższym współczynnikiem tarcia ( $\mu = 0,3$ ) charakteryzował się kompozyt PTFE 2. Może to być skutkiem dużej zawartości w nim brązu przy stosunkowo niskich zawartościach smarów stałych (grafitu i  $\text{MoS}_2$ ). Na taką zależność właściwości smarnych od składu kompozytu wskazują właściwości tribologiczne kompozytu PTFE 10 (40,0% brązu, 10,5% grafitu, 2,2%  $\text{MoS}_2$ ). Wyraźne zwiększenie udziału smarów stałych w tym kompozycie w stosunku do kompozytu PTFE 2 spowodowało obniżenie współczynnika tarcia do wartości 0,28. Dalszy wzrost udziału smarów stałych (kompozyt PTFE 4) do 18,8% zapewniło dalsze obniżenie współczynnika tarcia do wartości 0,26.

**Tabela 2. Zużycie masowe próbek materiałów kompozytowych wytwarzanych na bazie PTFE**

Symbol próbki	Wielkość zużycia, [mg]	Symbol próbki	Wielkość zużycia, [mg]
PTFE 0	9,0	PTFE 1	0,4
PTFE I	0,75	PTFE 2	0,3
PTFE II	0,25	PTFE 3	0,25
PTFE III	0,1	PTFE 4	0,15
PTFE IV	0,35	PTFE 5	0,1
PTFE V	0,25	PTFE 6	0,2
PTFE VI	0,1	PTFE 7	0,0
PTFE VII	16	PTFE 8	0,45
PTFE VIII	16	PTFE 9	0,0
PTFE IX	45	PTFE 10	0,1
		PTFE 11	0,15
		PTFE 12	0,2
		PTFE 13	0,0

Pomimo wyższych współczynników tarcia, zużycie kompozytów wieloskładnikowych było niższe niż jednoskładnikowych, o niższych współczynnikach tarcia. Szczególnie duże zużycie kompozytu, wzrastające wraz ze wzrostem zawartości napełniacza, stwierdzono dla kompozytów binar-

nych zawierających  $\text{MoS}_2$  (PTFE VII, VIII i IX). Było ono o dwa rzędy wielkości wyższe niż dla próbek zawierających inne badane napełniacze. Zjawisko to jest trudne do wyjaśnienia zużyciem ściernym lub adhezyjnym. Jedną z przyczyn mogą być niekontrolowane procesy chemiczne, związane z właściwościami używanego  $\text{MoS}_2$ . Istotną rolę w tym procesie mogły odegrać pewne ilości fluoru (silny utleniacz) uwalniane we wczesnych fazach destrukcji PTFE w wyniku tarcia. Wyjaśnienie tego problemu wymaga odrębnych badań. W przypadku pozostałych badanych napełniaczy wzrost ich udziału w PTFE powodował obniżenie zużycia. Można stwierdzić, że wielkość zużycia masowego wyraźniej niż opory ruchu różnicuje właściwości tarciove kompozytów PTFE, zawierających zmienne ilości poszczególnych napełniaczy, w kontakcie ze stalą. Zużycie masowe czteroskładnikowych kompozytów PTFE w kontakcie tarciovym ze stalą było na ogół niższe niż kompozytów dwuskładnikowych. W części przypadku nie przekraczało ono błędu pomiaru masy.

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania potwierdziły, że zużycie kompozytów PTFE w układzie tarciovym ze stalą nie jest bezpośrednią pochodną oporów ruchu. Na przykład: próbki PTFE II i PTFE IV zawierały różne napełniacze – brąz i grafit, które spełniają w układzie tarciovym różne funkcje. W efekcie opory ruchu w funkcji drogi tarcia (**Rys. 1**) oraz współczynniki tarcia skojarzenia zawierającego te materiały (**Rys. 2**) znacznie różniły się. Pomimo tego zużycie masowe obydwu próbek było zbliżone (**Tab. 2**). Szczegółowe badanie wartości współczynników tarcia i zużycia kompozytów zawierających zmienne ilości różnych napełniaczy w Tarflenie także nie wykazały jednoznacznych zależności pomiędzy składem kompozytu a jego właściwościami tribologicznymi. Przy doborze składu kompozytów PTFE, współpracujących tarciovym ze stalą, należy więc bardzo ostrożnie podejmować decyzje w sprawie wyboru napełniaczy funkcjonalnych, a założenia każdorazowo weryfikować eksperymentalnie.

## LITERATURA

1. Tevrúz T.: Tribological behaviours of carbon filled polytetrafluoroethylene (PTFE) dry journal bearings. *Wear* 221 (1998) 61–68.
2. Tevrúz T.: Tribological behaviours of bronze – filled polytetrafluoroethylene dry journal bearing. *Wear* 230 (1999) 61–69.



3. Osuch-Słomka E., Grądkowski M.: Zależność właściwości tarcowych kompozytów politetrafluoroetyleny od zawartości napełniacza. *Problemy Eksploatacji*, 2002, 4, 151–159.
4. Osuch-Słomka E., Grądkowski M.: Zależność właściwości tarcowych od zawartości napełniaczy czteroskładnikowych kompozytów tarflenowych, *Problemy Eksploatacji* 2003, 1.
5. Opracowanie metody prognozowania właściwości tribologicznych kompozytów polimerowych stosowanych na uszczelnienia czołowe na podstawie pomiarów energii powierzchniowej. Sprawozdanie z projektu badawczego 7T08C 055 19, red. M. Grądkowski, ITeE, Radom 2002.
6. Mańczak K.: *Technika planowania eksperymentu*. WNT, Warszawa 1976.
7. Doerffel K.: *Statystyka dla chemików analityków*. WNT, Warszawa 1989.
8. Wieleba W., Ziemiański K.: Tribologiczne aspekty wykorzystania wieloskładnikowych kompozytów polimerowych na osnowie PTFE. VII Seminarium Tworzywa Sztuczne w Budowie Maszyn. Kraków 1994r, s. 417–422.

**Recenzent:**  
**Janusz JANECKI**

### Summary

**In this work was finding an effect of the content of graphite, disulphide of molybdenum (MoS<sub>2</sub>) and bronze on sliding properties of PTFE composites in the contact with a tool steel. It was observed that an influence of fillers on the sliding properties of PTFE composites is hard to assess. For example, a decrease in friction with increasing wear was shown. For different friction coefficient values similar wear (mass loss) was noted. So, wear of PTFE composites rubbing against steel is independent of friction. It has been concluded that selection of fillers for PTFE composites which are to rub against steel must be performed very carefully. In every case experimental way is necessary.**