

Dymitry CAPANIDIS* , Magdalena KLEBAŃSKA*

BADANIA TRIBOLOGICZNE KOMPOZYTÓW POM Z WŁÓKNEM ARAMIDOWYM I Z PROSZKIEM PTFE WSPÓŁPRACUJĄCYCH ZE STALĄ

TRIBOLOGICAL STUDIES OF POM COMPOSITES WITH THE ADDITION OF ARAMID FIBER AND WITH POWDER PTFE COOPERATING WITH STEEL

Słowa kluczowe:

kompozyty POM, włókno aramidowe, proszek PTFE, tarcie ślizgowe, zużycie

Key words:

POM composites, aramid fiber, powder PTFE, sliding friction, wear

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki tribologicznych badań porównawczych kompozytów na osnowie polioksymetyleny (POM), o nazwie handlowej Tarnoform, z ciętymi włóknami aramidowymi oraz z proszkiem PTFE. Wymienione napełniacze występowały w kompozytach w różnych zesta-

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

wieniach – pojedynczo i łącznie. Kompozyty wzmacniane włóknami aramidowymi, a także włóknami aramidowymi z jednoczesnym dodatkiem PTFE są nowymi materiałami, których właściwości tribologiczne nie zostały jeszcze szerzej zbadane. Do oceny właściwości tribologicznych badanych kompozytów podczas tarcia technicznie suchego ze stałą przyjęto także niemodyfikowany POM oraz POM z dodatkiem proszku PTFE, które stanowiły materiały odniesienia. Badania mikroskopowe SEM umożliwiły określenie wpływu stosowanych napełniaczy na zmiany zachodzące w budowie warstwy wierzchniej kompozytów POM po procesie tarcia. Na podstawie tych badań sformułowano hipotezę dotyczącą występujących rodzajów tarcia i zachodzących procesów zużywania podczas ślizgowej współpracy badanych kompozytów POM ze stałą w warunkach tarcia technicznie suchego.

WPROWADZENIE

Polioksymetylen (POM) jest tworzywem termoplastycznym, charakteryzującym się dobrymi własnościami wytrzymałościowymi oraz dobrymi właściwościami tribologicznymi, a przy tym pozwala na dokładne odwzorowanie kształtów i wykazuje się dobrą stabilnością wymiarową [L. 1]. Pozwala to na jego szerokie zastosowanie w budowie odpowiedzialnych elementów maszyn i urządzeń oraz bezobsługowych węzłów ślizgowych [L. 2, 3]. Postęp w technice przyczynia się do opracowywania nowych materiałów o coraz lepszych wybranych właściwościach użytkowych [L. 5, 6, 9]. Na zmniejszenie strat energii oraz zwiększenie trwałości i niezawodności węzłów tarcia mają wpływ wartość współczynnika tarcia oraz odporność na zużywanie tribologiczne [L. 3, 11]. W celu poprawienia tych właściwości stosuje się modyfikację fizyczną polimeru różnego rodzaju napełniaczami [L. 8, 9, 13, 14].

PRZEDMIOT BADAŃ

Przedmiotem porównawczych badań tribologicznych były wybrane odmiany Tarnoformu (kopolimeru POM) wyprodukowane przez Zakłady Azotowe S.A. w Tarnowie, które są oznaczone przez producenta jako [L. 14]:

- Tarnoform T200 – standardowa odmiana do wytłaczania, może być również stosowana do wtrysku grubościennych elementów o małym stopniu komplikacji kształtu (o niskim wskaźniku szybkości płynięcia),

- Tarnoform T300 – standardowa szybko zestalająca się odmiana przeznaczona do przetwórstwa wtryskowego (o wyższym wskaźniku szybkości płynięcia niż T200),
- Tarnoform T300TF2 – odmiana ślizgowa z dodatkiem 10% proszku PTFE, obniżającym współczynnik tarcia i ścieralność,
- Tarnoform T300TF4 – odmiana ślizgowa z dodatkiem 20% PTFE, znacząco obniżającym współczynnik tarcia i ścieralność,
- Tarnoform T200AR – odmiana z dodatkiem 5% włókien aramidowych (nieznajdująca się w ofercie handlowej),
- Tarnoform T300AR2TF2 – odmiana zawierająca 10% włókien aramidowych i 10% proszku PTFE (nieznajdująca się w ofercie handlowej).

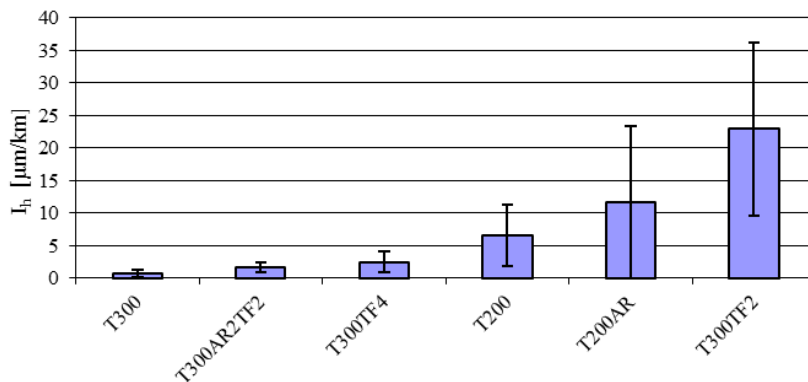
Podane procentowe zawartości wypełniaczy w kompozytach zostały określone wagowo. Niemodyfikowane polimery T200 i T300 przyjęto jako materiały odniesienia do celów porównawczych.

METODYKA BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Badania tribologiczne przeprowadzono z użyciem tribometru T-01M typu „pin-on-disc” [L. 7], w którym próbki z badanych materiałów (o kształcie walca 8×8 wykonane metodą wtryskową) współpracowały czołową powierzchnią z przeciwpróbkami wykonanymi ze stali C45. Przeciwpróbki ulepszano cieplnie do twardości 44–46 HRC i szlifowano w celu uzyskania współśrodkowych śladów obróbki o wartości parametru chropowatości RA w zakresie od 0,65 μm do 0,75 μm . Wielkościami analizowanymi w badaniach tribologicznych były: wartość współczynnika tarcia oraz intensywność zużycia I_H [m/km], określana jako liniowe zużycie próbek odniesione do drogi tarcia wynoszącej 20 km. Przed rozpoczęciem pomiarów powierzchnie próbek polimerowych były docierane na dystansie minimum 5 km w celu zapewnienia przylegania pary materiałów do siebie całą nominalną powierzchnią styku. Badania prowadzono w ustalonych warunkach tarcia, w których prędkość ślizgania $V = 1$ m/s, a nacisk jednostkowy $P = 1$ MPa.

WYNIKI BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

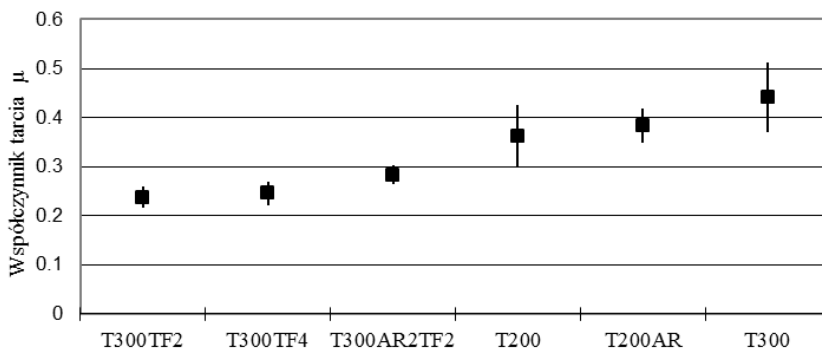
Intensywności zużycia liniowego POM i jego kompozytów, określone na podstawie badań tribologicznych, przedstawiono w postaci wykresu na **Rys. 1**, wraz z zaznaczonymi przedziałami ufności dla poziomu istotności 0,95.



Rys. 1. Intensywność zużycia liniowego badanych kompozytów na osnowie POM

Fig. 1. The intensity of linear wear of tested composites on the basis of POM

Wykres na **Rys. 2** przedstawia wartości współczynnika tarcia μ badanych skojarzeń oraz ich przedziały ufności określone dla poziomu istotności 0,95.



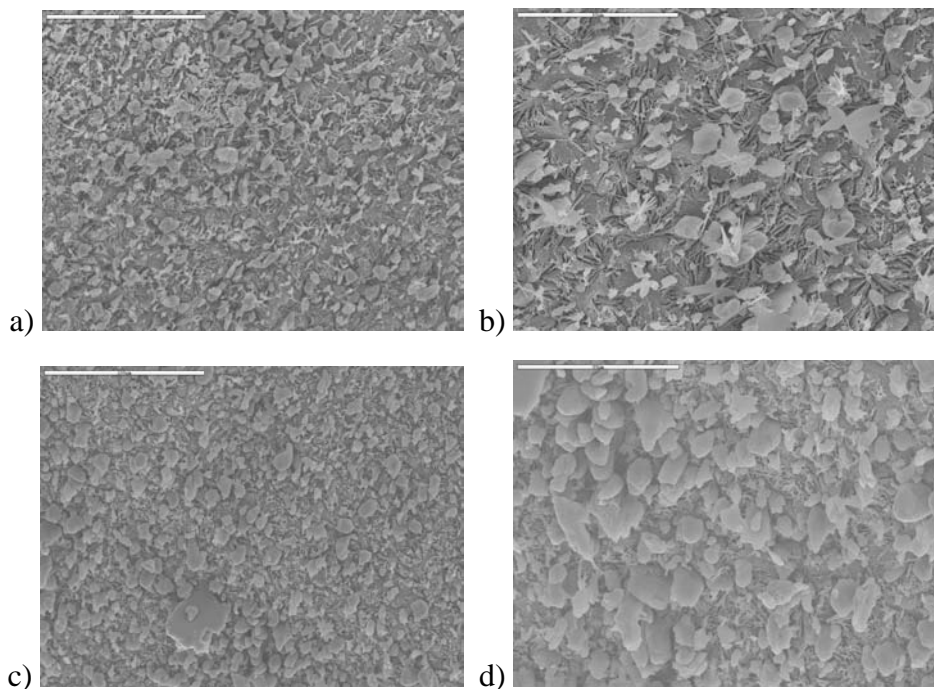
Rys. 2. Współczynnik tarcia badanych kompozytów na osnowie POM

Fig. 2. The coefficient of friction of tested composites on the basis of POM

Najmniejszą intensywnością zużycia wykazał się niemodyfikowany POM (T300) oraz kompozyt T300AR2TF2 zawierający jednocześnie włókna aramidowe i PTFE, a największe zużycie miał kompozyt T300TF2 zawierający PTFE oraz kompozyt T200AR zawierający włókna aramidowe. Najmniejszym współczynnikiem tarcia charakteryzowały się kompozyty zawierające PTFE, co wynika z tego, że PTFE zmniejsza oddziaływania adhezyjne. Natomiast największą wartością współczynnika tarcia wykazał się POM (T300).

BADANIA MIKROSKOPOWE

Badania mikroskopowe obejmowały obserwacje warstwy wierzchniej (WW) wszystkich badanych materiałów polimerowych po procesie tarcia. W tym celu wykonano zglądy WW pod kątem 30° , które następnie trawiono 75% kwasem siarkowym dla ukazania struktury badanych kompozytów. Mikroskopowe obserwacje prowadzono za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) JSM-5800LV firmy JOEL. W artykule przedstawiono mikrofotografie tylko dwóch wybranych kompozytów. Na **Rys. 3** przedstawiono strukturę WW przy powierzchni ślizgowej kompozytów POM z dodatkiem PTFE.



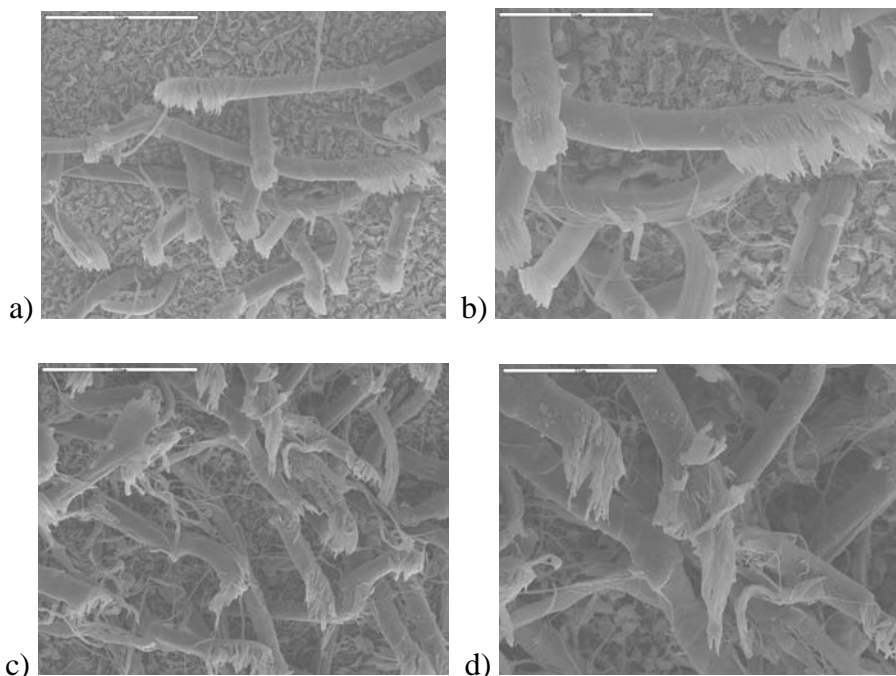
Rys. 3. Struktura wytrawionego przekroju warstwy wierzchniej po procesie tarcia ze stalą: a, b – POM + 10% PTFE; c, d – POM + 20% PTFE (obszar mikrofotografii: a, c – 260 m x 200 m; b, d – 130 m x 100 m)

Fig. 3. Structure of the etched cross section of the surface layer after the friction with steel: a, b – POM + 10% PTFE; c, d – POM + 20% PTFE (the microphotography area: a, c – 260 m x 200 m; b, d – 130 m x 100 m)

Nieodporny na działanie kwasu siarkowego POM został wytrawiony, a na powierzchni uwidocznił się PTFE. Na **Rys. 3a, b** widać, że PTFE

w postaci płatków w materiale T300TF2 nie pokrywa całej powierzchni, w odróżnieniu do kompozytu T300TF4, gdzie płatki PTFE (którego jest tu dwukrotnie więcej) dość szczelnie osłaniają polioksymetylenową matrycę kompozytu (**Rys. 3c, d**).

Na **Rys. 4** przedstawiono strukturę przekroju przez WW kompozytu POM z dodatkiem 5% włókien aramidowych (T200AR) oraz kompozytu zawierającego 10% włókien aramidowych i 10% PTFE (T300AR2TF2).



Rys. 4. Struktura wytrawionego przekroju warstwy wierzchniej po procesie tarcia ze stalą: a, b – POM + 5% włókien aramidowych; c, d – POM + 10% włókien aramidowych + 10% PTFE (obszar mikrofotografii: a, c – 260 m x 200 m; b, d – 130 m x 100 m)

Fig. 4. Structure of the etched cross section of the surface layer after the friction with steel: a, b – POM + 5% aramid fibers; c, d – POM + 10% aramid fibers + 10% PTFE (the microphotography area: a, c – 260 m x 200 m; b, d – 130 m x 100 m)

Na **Rys. 4a, b** widoczne są włókna wystające z tworzywa, ponieważ podczas trawienia nie zostały one wytrawione, natomiast w tle widać strukturę sferolityczną POM. Uszkodzenia włókien aramidowych powstały w procesie przygotowywania zglądu. W głębi struktury widać, że

włókna te mają gładką powierzchnię i ułożone są w kierunku mniej więcej prostopadłym do powierzchni. Na **Rys. 4c, d** można zaobserwować, że włókna aramidowe (których jest dwukrotnie więcej niż w porównywanym kompozycie **Rys. 4a, b**) oplecione są przez PTFE w postaci nitek. Płatki PTFE przeszły w formę nitek prawdopodobnie w trakcie procesu przetwórczego, odbywającego się w temperaturze, w której POM zostaje stopiony, a PTFE i włókna aramidowe mają jeszcze postać ciał stałych. W trakcie mieszania się składników pomiędzy POM i PTFE nie zachodzą znaczące oddziaływania w przeciwieństwie do kompozytu POM z PTFE i z włóknami aramidowymi. Można przypuszczać, że płatki PTFE przyklejają się do włókien aramidowych i w wyniku mieszania się składników są one rozciągane, tworząc w ten sposób nitki, które następnie oplatają włókna aramidowe. Tak oplecione włókna aramidowe są chronione przed zużywaniem ściernym i wrywaniem z matrycy kompozytu, ponieważ zostały zmniejszone oddziaływania adhezyjne z przeciwpróbką.

WNIOSKI

- Niemodyfikowany polioksymetylen T300 charakteryzował się najmniejszą intensywnością zużycia i największą wartością współczynnika tarcia. Spowodowane może być to dużą adhezją niemodyfikowanego POM do stali przy jednocześnie dużej kohezji samego polimeru, a więc i jego dużej wytrzymałości na ścinanie, co wyjaśnia małe zużycie zaobserwowane w trakcie badań oraz dużą wartość współczynnika tarcia [**L. 12, 13**].
- Niemodyfikowana odmiana polioksymetylenu T200 wykazywała znacznie większe zużycie niż odmiana T300. Prawdopodobnie jest to spowodowane budową łańcucha polimeru. Można przypuszczać, że dłuższe i zarazem cięższe makrocząsteczki powodowały większy ubytek materiału POM [**L. 4**].
- Podczas badań tribologicznych zaobserwowano zmniejszenie wartości współczynnika tarcia w próbkach zawierających dodatek PTFE, który zmniejsza oddziaływania adhezyjne między współpracującymi materiałami i zwiększa wartości współczynnika tarcia w przypadku dodania włókien aramidowych, powodujących zwiększenie oddziaływań ściernych [**L. 8**].
- POM z dodatkiem 10% PTFE (T300TF2) wykazał największą intensywność zużywania w odróżnieniu od kompozytu POM z dodatkiem

20% PTFE (T300TF4), który charakteryzował się jedną z najmniejszych intensywności zużywania. Wynika to prawdopodobnie z tego, że w pierwszym przypadku jest zbyt mało PTFE w kompozycie, by utworzyć podczas tarcia szczelny film PTFE na powierzchni stalowego przeciwelementu, który mógłby skutecznie ograniczyć oddziaływanie adhezyjne między współpracującymi materiałami. Z drugiej strony obecność PTFE w matrycy POM powoduje zmniejszenie wytrzymałości kompozytu i wzrost intensywności zużywania podczas tarcia.

- Kompozyt POM z dodatkiem 5% włókien aramidowych (T200AR) wykazał się dużą intensywnością zużycia i dużym współczynnikiem tarcia. Przyczyną tego są znaczne oddziaływania adhezyjne (wynikające z braku PTFE w kompozycie) oraz oddziaływania ściernie spowodowane obecnością włókien aramidowych. Potwierdzać to może, zaobserwowane w tym przypadku, również największe zmniejszenie chropowatości stalowej przeciwpróbki.
- Kompozyt polimerowy POM z dodatkiem 10% włókien aramidowych i 10% PTFE charakteryzuje się jednym z najmniejszych zużyć (niewiele większe niż T300) oraz małym współczynnikiem tarcia. Małe zużycie spowodowane jest tym, że włókna chronione są przez PTFE w postaci nitek, które je oplatają (**Rys. 4c, d**), powodując zmniejszenie oddziaływań adhezyjnych między metalowym przeciwelementem a włóknami. Mały współczynnik tarcia (trochę większy niż w materiałach T300TF2 i T300TF4) związany jest z obecnością w materiale dodatku PTFE, który znacząco zmniejsza udział oddziaływań adhezyjnych oraz dodatku włókien aramidowych, które wskutek oddziaływania ściernego nieznacznie podnoszą wartość tego współczynnika.
- Kompozyt T300AR2TF charakteryzuje się najlepszymi właściwościami tribologicznymi przy współpracy ze stalowym przeciwelementem. Wykazuje on stosunkowo małą intensywność zużywania i małą wartość współczynnika tarcia. Te dobre właściwości tribologiczne wynikają z synergistycznego efektu działania jednoczesnego wprowadzenia do matrycy POM dodatku proszku PTFE oraz włókien aramidowych [**L. 9, 10**].

LITERATURA

1. Barker S.J., Price M.B.: Polyacetals. London 1970.
2. Biernacki K., Stryczek J.: Analysis of stress and deformation in plastic gears used in gerotor pumps. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, October 2010, vol. 45, Issue 7, p. 465–479.
3. Capanidis D., Wieleba W., Ziemiański K.: Polimerowe łożyska ślizgowe, w: *Tribologia i tribotechnika*. Red. nauk. Szczerek M., Wiśniewski M. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2000, s. 683–699.
4. Capanidis D.: Ocena degradacji polioksymetylenu (POM) zachodzącej podczas jego tarcia po stali. *Tribologia* 2002, R. 33, nr 3, s. 801–809.
5. Capanidis D.: Badania tribologiczne kompozytów ślizgowych na bazie polioksymetylenu (POM) – Tarnoformu. *Tribologia* 2004, R. 35, nr 3, s. 25–33.
6. Capanidis D.: Tribologiczne właściwości kompozytów polioksymetylenu zawierających napelniaz proszkowy PTFE lub PE-UHMW. *Tribologia* 2007, R. 38, nr 2, s. 105–115.
7. Capanidis D.: Selected aspects of the methodology of tribological investigations of polymer materials. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. VII, No. 4, 2007, s. 39–55.
8. Capanidis D.: Zmiany struktury warstwy wierzchniej wieloskładnikowych kompozytów POM podczas tarcia ze stalą. *Tribologia* 2008, R. 39, nr 2, s. 81–89.
9. Capanidis D.: Tribologiczne badania wieloskładnikowego kompozytu na osnowie polioksymetylenu podczas tarcia ze stalą. *Tribologia* 2009, R. 40, nr 3, s. 19–30.
10. Krawiec S.: The synergistic effect of copper powder with PTFE in a grease lubricant under mixed friction conditions. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2011, tom. 11, nr 2, s. 379–390.
11. Rymuza Z.: Tribology of polymers. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. VII, No. 4, 2007, s. 177–184.
12. Wieleba W.: The mechanism of tribological wear of thermoplastic materials. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. VII, No. 4, 2007, s. 185–199.
13. Wieleba W.: Analiza procesów tribologicznych zachodzących podczas współpracy kompozytów PTFE ze stalą. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 2002.
14. <http://azoty.tarnow.pl/pl/category/index/607>.

Recenzent:**Monika GIERZYŃSKA-DOLNA**

Summary

The article presents the results of comparative tribological studies of composites based on polyoxymethylene (POM), with the trade name Tarnoform, with cut aramid fibres and PTFE powder. These fillers have occurred in the composites in different combinations - individually and together. Composites reinforced with aramid fibres and aramid fibres with the addition of PTFE are new materials, whose tribological properties have not yet been widely explored. To evaluate the tribological properties of the tested composites during technically dry friction on steel, an unmodified POM and POM with the addition of PTFE powder was also used, which were the reference materials. SEM microscopic examination allowed the researchers to determine the effect of fillers used on changes in the structure of the surface layer of POM composites after the process of friction. Based on these studies, a hypothesis concerning the types of friction and wear processes occurring during the sliding test of tested POM composites with steel in technically dry friction conditions was formulated.