

**Marian SZCZEREK, Jacek PRZEPIÓRKA\***

## **MECHANIZMY ZUŻYCIA POLIMEROWO- -METALOWYCH WĘZŁÓW TARCIA**

### **WEAR MECHANISMS OF POLYMER-METAL TRIBOSYSTEMS**

#### **Słowa kluczowe:**

tarcie, zużycie, kompozyt, powłoki przeciwzużyciowe, przenoszenie polimeru

#### **Key words:**

friction, wear, antiwear coating, polymer transfer

#### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono wyniki badań polimerowo-metalowych węzłów tarcia. Przeprowadzono badania tarciove różnych skojarzeń materiałowych, w wyniku których podjęto próbę wyjaśnienia mechanizmów odpowiedzialnych za transfer polimeru na element stalowy.

---

\* Politechnika Radomska, ul. Chrobrego 27, 26-600 Radom.

## WSTĘP

Rozwój nauki o tarcu zewnętrznym postępował od makroskopowej oceny oporów ruchu do mikroskopowej analizy procesów zachodzących w strefie tarcia. Większość teorii tarcia zostało opracowanych dla metali [L. 1]. Polimery są grupą materiałów, których właściwości mechaniczne w dużym stopniu zależą od stanu naprężeń (szczególnie od wartości tensora ściskania), są one znacznie bardziej wrażliwe na oddziaływanie efektów procesów zachodzących w procesie tarcia oraz warunków otoczenia. Duża liczba zjawisk fizycznych i chemicznych leżąca u podstawy procesu tarcia tworzyw sztucznych powoduje, że chociaż ogólne postulaty teorii tarcia mogą być przyjęte także dla polimerów, to jednak analiza procesu tarcia jest trudna i jeszcze przez długi czas będzie przysparzała wiele problemów.

Szerokie zastosowanie tworzyw sztucznych na ślizgowe elementy maszyn związane jest z możliwością modyfikacji polimerów. Właściwie przeprowadzony proces modyfikacji pozwala na poprawę właściwości szczególnie pożądanых, nie powodując przy tym pogorszenia innych. Istnieje wiele sposobów modyfikacji polimerów. Najczęściej stosowaną metodą jest modyfikacja poprzez napełnianie polimeru. Do najczęściej stosowanych napełniaczy polimerów należy zaliczyć: włókna aramidowe, włókno lub kuleczki szklane, włókno węglowe, grafit, sadzę, dwusiarczek molibdenu [L. 2, 3].

Rozwój zastosowań polimerowo-stalowych węzłów tarcia w budowie maszyn uzależniony jest od zwiększenia ich trwałości, limitowanej zużyciem elementu polimerowego. Ze zużyciem w takich węzłach ściśle związany jest proces przenoszenia materiału. Problem ten pozostaje wciąż otwarty, pomimo iż był przedmiotem wielu badań [L. 4–7]. Polega on na przeniesieniu materiału tworzywa na powierzchnię metalu, w wyniku czego po pewnym czasie współpraca metal–tworzywo sztuczne zmienia się we współpracę pary tworzywo–tworzywo. Proces przenoszenia powoduje zmniejszenie oporów tarcia, jednak znacznie pogarsza bilans cieplny węzła a w konsekwencji obniża właściwości tribologiczne polimeru. Dalszy rozwój polimerowo-metalowych skojarzeń trących w dużej mierze uzależniony jest od ograniczenia tego procesu.

## **BADANIA EKSPERYMENTALNE TARCIA I ZUŻYCIA POLIMEROWO-METALOWYCH WĘZŁÓW TARCIA**

Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych z poliamidu 66 oraz kompozytów, złożonych z matrycy poliamidowej napełnianej dwusiarczkiem molibdenu ( $\text{MoS}_2$ ). Z próbkami kompozytowymi oraz próbkami z poliamidu PA 66 współpracowały pierścienie stalowe wykonane ze stali ŁH 15 obrabianej cieplnie do ok. 42 HRC, na które naniesiono metodą PAPVD powłoki z azotku tytanu (TiN), azotku chromu (CrN) oraz węglazotku tytanu (Ti(CN)). Badania tribologiczne były realizowane w pomieszczeniu o stałej temperaturze i wilgotności, nie zmieniającej się więcej niż o 5%. Parametry procesu ustalone zostały na podstawie badań wstępnych. Dla każdej kombinacji materiałowej zostały wykonane po trzy biegi badawcze.

Badania tribologiczne przeprowadzono na testerze T-15, w którym węzeł tarcia składa się z polimerowej obracającej się tarczy i dociskanego do tej tarczy pierścienia.

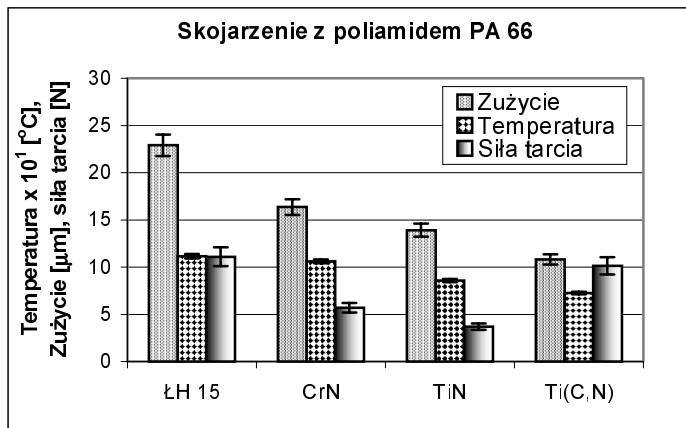
Z próbką polimerową o średnicy 39 mm i grubości 4 mm współpracował stalowy pierścień wykonany ze stali ŁH 15 o wymiarach  $\phi 23/\phi 19,1 \times 8,0$ .

Do wykonania analiz powierzchniowych materiału polimerowego przeniesionego na element stalowy i stalowy z naniesionymi powłokami wykorzystano skaningową mikroskopię elektronową (SEM), spektrometrię z dyspersją energii (EDS) oraz odbiciową mikrospektrofotometrię w podczerwieni (FTIRM).

Do oceny zużycia próbek wykorzystano wagę analityczną firmy METTLER o dokładności 0,01 mg. Do obserwacji śladów zużycia powstałych w trakcie tarcia na powierzchniach próbek i ewentualnego przenoszenia polimeru użyto mikroskopu NIKON NM 40.

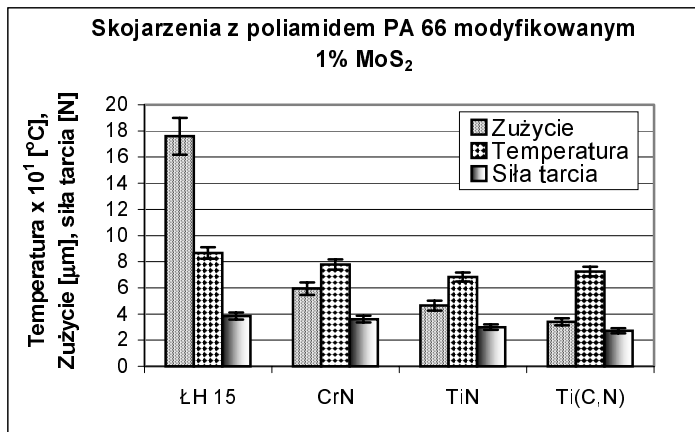
Przed badaniami próbki polimerowe oraz metalowe poddane były specjalnej procedurze mycia. Badania przeprowadzono stosując prędkość liniową  $v=0,2$  m/s oraz nacisk jednostkowy  $P=0,4$  MPa w warunkach tarcia technicznie suchego na drodze 6000 m.

Wyniki badań tribologicznych czystego poliamidu PA 66 oraz kompozytu napełnianego dwusiarczkiem molibdenu w ilości 1% przedstawiono na **Rys. 1–2**.



Rys. 1. Wartości zużycia, temperatury oraz siły tarcia dla poliamidu PA 66 współpracującego ze stalą, azotkiem tytanu, azotkiem chromu i węglazotkiem tytanu

Fig. 1. Linear wear, temperature and friction force for PA 66 polyamide mating: bearing steel, chromium nitride, titanium nitride and titanium carbon nitride



Rys. 2. Wartości zużycia, temperatury oraz siły tarcia dla poliamidu PA 66 modyfikowanego dwusiarczkiem molibdenu w ilości 1% współpracującego ze stalą, azotkiem tytanu, azotkiem chromu i węglazotkiem tytanu

Fig. 2. Linear wear, temperature and friction force for PA 66 polyamide modified MoS<sub>2</sub> at 1% concentration, mating: bearing steel, chromium nitride, titanium nitride and titanium carbon nitride

Współpraca poliamidu PA 66 z powierzchnią stalową zmodyfikowaną poprzez nałożenie na nią powłok przeciwzużyciowych z TiN oraz Ti(C, N) spowodowała zmniejszenie zużycia poliamidu (**Rys. 1**) w sto-

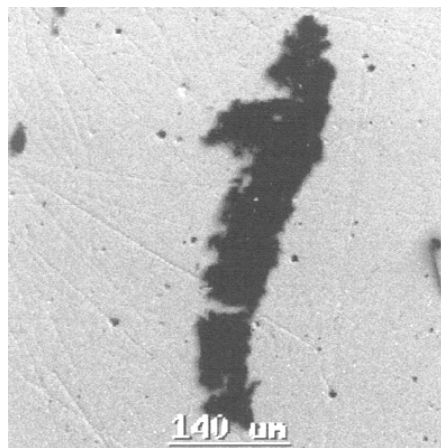
sunku do układu z powierzchnią stalową niemodyfikowaną. Dla wszystkich przebadanych skojarzeń otrzymano niższą temperaturę współpracy takiego węzła w odniesieniu do układu bez modyfikacji.

Optymalne warunki procesu tarcia otrzymano dla skojarzenia poliamid PA 66 modyfikowany 1% MoS<sub>2</sub> współpracujący z każdą z badanych powłok (**Rys. 2**). Zarejestrowano spadek wszystkich mierzonych parametrów w stosunku do układu PA 66 stal ŁH 15. Najmniejsze wartości zużycia i siły tarcia odnotowano dla powłoki Ti(C,N) (redukcja siły tarcia o 29 % natomiast zużycia o 81%). Największą redukcję temperatury współpracy badanych elementów uzyskano dla pokrycia TiN – 21%.

### BADANIA MECHANIZMÓW ZUŻYWANIA

Badaniom poddano dwa wybrane przypadki: skojarzenie o bardzo dobrych właściwościach tribologicznych: PA 66 modyfikowany MoS<sub>2</sub> – Ti(C,N) oraz skojarzenie o przeciętnych właściwościach: PA 66 – CrN. Na elemencie z warstwą CrN stwierdzono, w wyniku obserwacji optycznej – podobne (ale w znacznie mniejszej skali) jak podaje literatura przedmiotu w stosunku do skojarzenia polimer – stal [**L. 8**] – ciemne plamy, mogące świadczyć o obecności cząstek polimeru przeniesionego w czasie tarcia.

**Rys. 3** przedstawia obraz skaningowy segmentu pierścienia pokrytego powłoką CrN, uzyskany przy powiększeniu 40x i 180x. Na obrazie tym widoczne są ślady transferu materiału z tarczy polimerowej w postaci ciemnych plam.



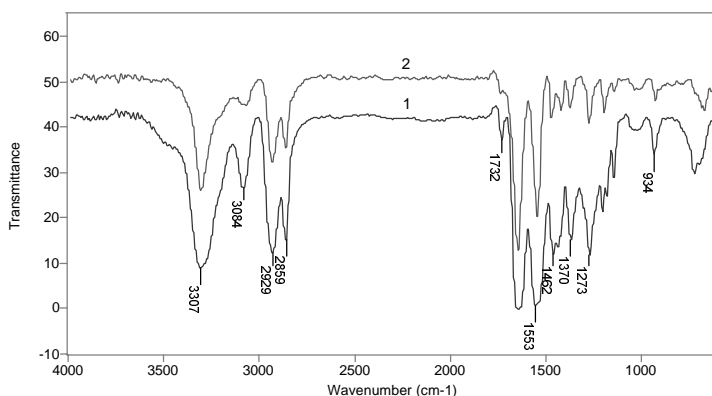
**Rys. 3. Obraz skaningowy segmentu badanego pierścienia. Powiększeni 180x**

Fig. 3. SEM image of the ring surface

Wynik analizy punkcie leżącym na „plamie” pozwala stwierdzić, że naniesiony materiał składa się z C, Si, przypuszczalnie N (azot może pochodzić z powłoki) oraz tlenu (pik O pokrywa się z pikiem Cr, a zatem można się tylko domyślać jego obecności). W skład poliamidów wchodzi jeszcze wodór, lecz jego analiza z użyciem EDS jest niemożliwa.

Analiza przeniesionego materiału metodą EDS pozwala stwierdzić obecność grupy pierwiastków we fragmencie namazanego materiału, natomiast nie pozwala na określenie jego budowy chemicznej. W celu dokonania analizy jakościowej przeniesionego materiału posłużono się techniką mikrospektrofotometrii FTIR w podczerwieni. Wyniki badań otrzymanych z analizowanego obszaru pozwalają stwierdzić, że w przeniesionym na pierścień materiale znajdują się grupy charakterystyczne dla poliamidów.

W celu stwierdzenia zgodności w budowie chemicznej materiału przeniesionego z materiałem polimerowym, sporządzono widmo IR materiału namazanego oraz kompozytu poliamidowego (**Rys. 4**).



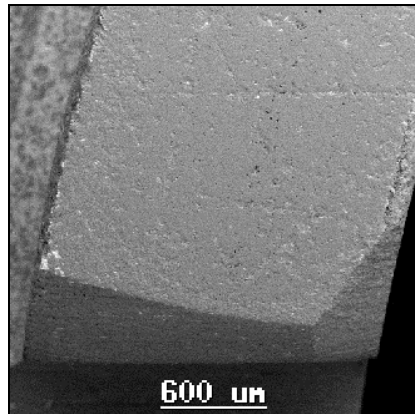
**Rys. 4.** Widma IR badanych materiałów: 1 – poliamidu PA 66 użytego do badań, 2 – poliamidu przeniesionego w procesie tarcia na pierścień CrN

Fig. 4. IR spectra for: 1 - sample of PA 66 polyamide, 2 - layer of PA 66 transferred onto CrN-coated ring

Porównanie charakterystycznych pików obu widm pozwala stwierdzić, że materiał przeniesiony na pierścień podczas badań ma identyczną budowę pod względem chemicznym jak materiał, z którego wykonano tarczę poliamidową. Można zatem stwierdzić, że w wyniku procesu tarcia dla skojarzenia PA66 – CrN następuje odrywanie poliamidu PA 66 z próbki kompozytowej a następnie przenoszenie polimeru na pierścień pokryty azotkiem chromu. Uzyskano w ten sposób potwierdzenie, że w

wyniku procesu tarcia następuje odrywanie fragmentów polimeru zawierających kompletne pod względem budowy chemicznej łańcuchy polimeru, które następnie są przenoszone na współpracujący element stalowy

**Rys. 5** przedstawia zdjęcie segmentu pierścienia przy powiększeniu 40x. Ze skojarzenia PA 66 modyfikowany 1% MoS<sub>2</sub>– stal ŁH 15 pokryta powłoką Ti(C,N).



**Rys. 5. Obraz skaningowy badanego segmentu. Powiększenie 40x**  
Fig. 5. SEM image of the ring segment

Inaczej niż dla poprzedniego skojarzenia, na tym obrazie skaningowym nie widać śladów transferu materiału z tarczy polimerowej. Potwierdza to analiza rentgenowska badanej powierzchni pierścienia

Można zatem stwierdzić, że współpraca kompozytu poliamidowego, modyfikowanego dwusiarczkiem molibdenu z elementem stalowym pokrytym powłoką z węglazotkiem tytanu, charakteryzuje się małym zużyciem kompozytu w wyniku radykalnego ograniczenia procesu transferu polimeru na współpracującą powierzchnię

## PODSUMOWANIE

Zużycie tworzyw sztucznych w polimerowo-stalowych układach trących determinowane jest przez dwa główne procesy: adhezyjne szczypanie oraz mechaniczne skrawanie warstwy wierzchniej tworzywa. Ograniczenie adhezyjnego przenoszenia materiału polimerowego na element współpracujący można osiągnąć poprzez zwiększanie chropowatości metalowego współpracownika (oddalenie powierzchni współpracujących na odległość większą niż oddziaływania sił atomowych), lecz dzieje się to

kosztem wzmożonego zużycia mechanicznego. Dlatego zużycie takich węzłów tarcia należy redukować zmniejszając oddziaływania adhezyjne w strefie tarcia. Rozwój wiedzy w tym obszarze doprowadził do rozwiązań technologicznych, w których współpracujący z elementem stalowym polimer jest odpowiednio modyfikowany. Autorzy wykazali, że jeszcze większe efekty można osiągnąć poprzez dobór modyfikatora tworzywa sztucznego skorelowany z doбором materiału warstwy wierzchniej (powłoki) stalowego przeciwpartnera.

## WNIOSKI

Uzyskane wyniki badań dowodzą, że możliwe jest znaczące zmniejszenie ilości przenieszonego materiału polimerowego na współpracujący element poprzez odpowiedni dobór modyfikatora polimeru skorelowany z doбором odpowiedniej powłoki naniesionej na element stalowy. Redukcję zużycia w takim węźle tarcia uzyskuje się na drodze zmniejszenia oddziaływań adhezyjnych współpracujących elementów.

## LITERATURA

1. Rymuza Z.: Trybologia polimerów ślizgowych. WNT Warszawa 1986.
2. Szczerek M., Przepiórka J.: Optymalizacja technologiczna systemu tribologicznego metal-polimer. Tribologia 2/99.
3. Przepiórka J., Szczerek M.: „The modification of metal-polymer friction pair” 2<sup>nd</sup> World Tribology Congress, 2001, Vienna.
4. Polak A.: Przenoszenie materiału w łożysku ślizgowym stal-tworzywo sztuczne. Monografia. Kraków 1998.
5. Kowala A., Pytko S.: Uwagi o oporach ruchu w implantach stawów człowieka. Tribologia 2001/5.
6. Bahadur S., Tabor D.: The wear of filled polytetrafluorethylene. Wear 1984, vol. 98.
7. Kołodziej E.: Metodyka badań i doboru tworzyw sztucznych na elementy ślizgowe. Monografia. Kraków 1993.

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

## Summary

**The results of the polymer-metal friction investigation are presented. The variety materials were tested for polymer transfer mechanism on steel surface explanation.**