

MECHANIKA

**CZASOPISMO TECHNICZNE**  
**TECHNICAL TRANSACTIONS**  
MECHANICS

WYDAWNICTWO  
POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1-M/2009  
ZESZYT 3  
ROK 106  
ISSUE 3  
YEAR 106

MARIAN SZCZEREK\*, JACEK PRZEPIÓRKA\*\*, WITOLD PIEKOSZEWSKI\*\*\*

## NOWY SPOSÓB ANTYCYPWANIA WŁAŚCIWOŚCI TRI- BOLOGICZNYCH SYSTEMÓW POLIMEROWO- METALOWYCH

### NEW METOD OF ANTYCYPATION THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF POLIMER-METAL SYSTEMS

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę zwiększania trwałości polimerowo-metalowych węzłów tarcia. Badania procesów występujących w polimerowo-metalowych węzłach tarcia dowodzą, że współpraca cienkiej polimerowej powłoki z powierzchnią metalową pokrytą powłoką o odmiennych od metalu właściwościach fizykochemicznych pozwala na wyeliminowanie wielu niekorzystnych zjawisk i znaczące złagodzenie negatywnych skutków procesu tarcia.

*Słowa kluczowe: poliamid, powłoka PVD, modyfikacja, tarcie, zużycie*

#### Abstract

The paper presents a new method for increasing of service life of the metal-polymer friction pair. The investigation of the processes occurring in polymer/metal friction pairs proves, that the interaction of thin polymer coating with metal surface covered by coating having other physicochemical properties enables to eliminate the numerous, mentioned above, drawbacks and by this, significantly reduce the negative consequences of the friction process.

*Keywords: polyamide, PVD thin coating, modification, friction, wear*

\* Prof. dr hab. inż. Marian Szczerek, Wydział Mechaniczny, Politechnika Radomska.

\*\* Dr inż. Jacek Przepiórka, Wydział Materiałoznawstwa, Technologii i Wzornictwa, Politechnika Radomska.

\*\*\* Dr inż. Witold Piekoszewski, Instytut Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu.

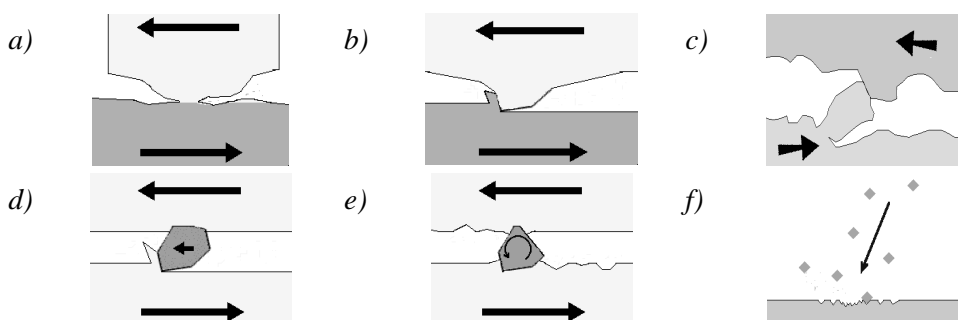
## 1. Wstęp

Rzeczony nauki o tarcniu zewnętrznym postępował od makroskopowej oceny oporów ruchu do mikroskopowej, a obecnie nawet nanoskopowej analizy procesów zachodzących w strefie tarcia. Większość teorii tarcia zostało opracowanych dla metali [1, 2]. Ogólne postulaty teorii tarcia mogą być przyjęte także dla polimerów, jednak analiza procesu tarcia jest znacznie trudniejsza. Polimery są materiałami znacznie bardziej wrażliwymi na oddziaływanie tarcia oraz na warunki otoczenia niż metale.

Zużycie pary tribologicznej, w której jednym z elementów jest metal, najczęściej stal, dokonuje się najczęściej poprzez skrawanie materiału polimerowego lub adhezyjne przeniesienie tworzywa sztucznego na element stalowy (rys. 1). Efektem procesu zużycia jest ciągły ubytek masy stykających się elementów będących w ruchu względnym. Można wyróżnić zużycie mechaniczne i międzyfazowe (adhezyjne). Zużycie mechaniczne zachodzi głównie przez ścieranie lub zmęczeniowe pęknięcie i wykruszanie się cząstek materiału.

Ze zużyciem polimerowo-metalowych węzłów tarcia bardzo często ściśle związany jest proces przenoszenia polimeru na powierzchnię metalu, w wyniku czego, po pewnym czasie, współpraca metal-tworzywo sztuczne zmienia się we współpracę pary tworzywo-tworzywo [2-4].

W jego wyniku następuje początkowo zmniejszenie oporów ruchu, wytłumienie drgań, ale i pogorszenie właściwości termodynamicznych węzła tarcia, szczególnie w przypadku nanoszenia grubych warstw polimeru.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie mechanizmów zużycia materiałów polimerowych:  
a) adhezyjny, b) mikroskrawanie, c) zmęczeniowy, d) ścierny,  
e) zmęczeniowo-ścierny, f) erozyjny

Fig. 1. Scheme of wear mechanisms of polymers: a) adhesion, b) micro-cutting, c) fatigue  
d) abrasion, e) fatigue-abrasion, f) erosion

Proces przenoszenia jest inicjowany przez lokalne, silne szczytowania adhezyjne powierzchni trących. W literaturze przedmiotu funkcjonuje kilka teorii opisujących powstawanie oddziaływań adhezyjnych [1, 5]: mechaniczna, adsorpcyjna, elektryczna, dyfuzyjna, chemiczna. Teoria mechaniczna tłumaczy adhezję wnikaniem mikronierówności jednej powierzchni i mikroszczeliny przeciwności, pozostającego z nim w kontakcie. W teorii adsorpcyjnej przyjmuje się, że pojawienie się szczytów między powierzchniami jest skut-

kiem występowania sił van der Waalsa; im większa polarność powierzchni tym większa jest ich adhezja. Teoria elektryczna przyjmuje elektryzowanie się powierzchni i występowanie przyciągania elektrostatycznego jako przyczynę adhezji. Koncepcja dyfuzyjna zakłada wzajemne wnikanie łańcuchów makrocząsteczek, a za warunek dyfuzji uznaje wzajemną mieszalność polimerów. Teoria chemiczna zakłada powstawanie wiązań chemicznych między materiałami w miejscach kontaktu [6]. Najprawdopodobniej wszystkie opisane wyżej mechanizmy powstawania więzi adhezyjnej mają miejsce w węzłach frykcyjnych. Jednak zależnie od skojarzenia materiałowego (rodzaje współpracujących materiałów i ich struktura) oraz warunków prowadzenia eksperymentu dominować będzie jeden z wymienionych mechanizmów.

Analizując mechanizmy zużywania polimerów, szczególnie w czasie tarcia z metalem, należy stwierdzić, że większość spośród istniejących, licznych ich opisów ma charakter hipotetyczny, trudny do zweryfikowania, a wiele spośród teorii zweryfikowanych eksperymentalnie ma charakter cząstkowy, nie uprawniający do uogólnień w takim stopniu, by można było budować na ich podstawie nadające się do optymalizowania procedury technologiczne. Dominującym wszakże mechanizmem zużywania jest adhezja, powodująca nie tylko przenoszenie polimeru na metal, lecz również przyczyniająca się do zużycia zmęczeniowego przez zwiększenie stycznych sił tarcia powodujących pękanie polimeru, a w konsekwencji wykruszania jego cząstek, mogących powodować zużycie ściernie.

## 2. Opis i kształtowanie intensywności zużywania polimerowo-metalowych węzłów tarcia

Badaniom poddane zostały układy polimerowo-metalowe, w których element polimerowy był wykonany z poliamidów PA 6 oraz PA 6.6, czystych oraz modyfikowanych grafitem i dwusiarczkiem molibdenu, w ilościach zalecanych przez producentów polimerowych łożysk ślizgowych. Element metalowy wykonany był ze stali, pokrytej typową powłoką CrN, a także, dla sprawdzenia celowości dalszych poszukiwań, coraz szerzej aplikowaną powłoką WC/C. Rozwijane intensywnie technologie cienkich powłok przeciwzużyciowych umacniają znaczenie stali jako materiału konstrukcyjnego, stąd również jej wybór do badań jako materiału podłoża dla powłok.

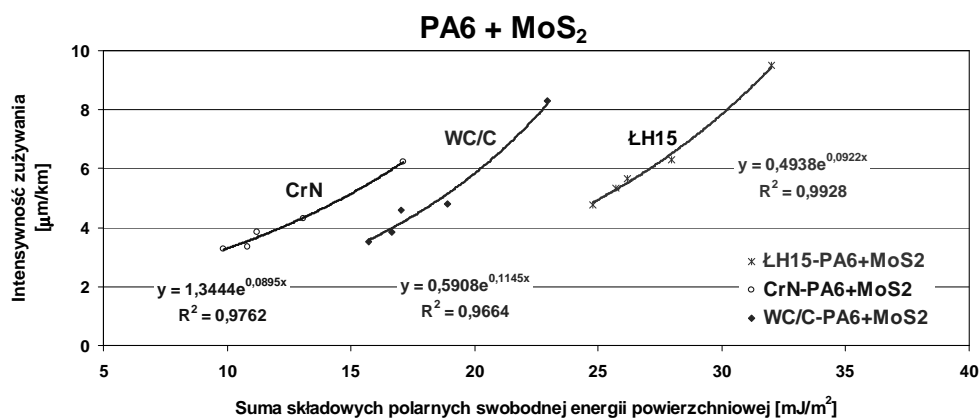
Badania tribologiczne przeprowadzono na testerze T-15, w którym węzeł tarcia składa się z polimerowej obracającej się tarczy i dociskanego do tej tarczy pierścienia. Z próbką polimerową o średnicy 39 mm i grubości 4 mm współpracował stalowy pierścień wykonany ze stali ŁH 15 o twardości 28 HRC i wymiarach  $\phi 23/\phi 19,1 \times 8,0$ .

Obliczenia swobodnej energii powierzchniowej wykonano na podstawie zmierzonych kątów zwilżalności badanych materiałów na goniometrze Krüss. Do oceny zużycia próbek wykorzystano wagę analityczną firmy METTLER o dokładności 0,01 mg oraz profilografu firmy HOMMELWERKE. 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. Przed rozpoczęciem testu próbki były wygrzewane w temp. 313 K przez 30 min. 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.

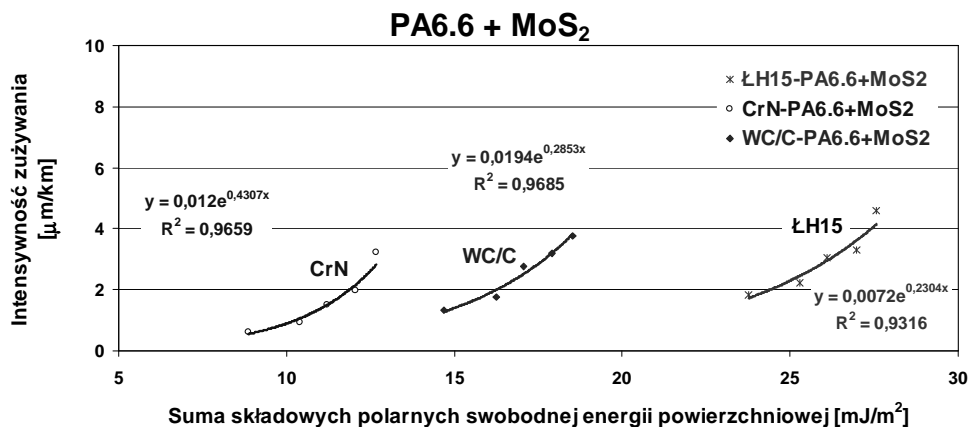
Wyniki badań zostały zamieszczone na wykresach (rys. 2 – rys. 5), wykonanych dla najpowszechniej stosowanych w budowie polimerowo-metalowych węzłów tarcia materiałów: poliamidu (PA 6.6 i krajowego PA 6) oraz stali. Poliamid był modyfikowany typowymi napełniaczami: grafitem oraz  $\text{MoS}_2$ . Stal pokryta była również typowymi powłokami CrN oraz WC/C wykonanymi technikami PVD. Stosując różną zawartość napełniaczy w matrycy polimerowej przebadanych kompozytów oraz pokrywając stal różnymi powłokami wpływało na zmianę sumy składowych polarnych swobodnej energii powierzchniowej obu elementów trących. Modyfikacji poliamidów towarzyszyła zmiana oddziaływań występujących w strefie tarcia kompozyt – powłoka czego odzwierciedleniem była intensywność ich zużycia w skojarzeniu z powłokami PVD.

Mające charakter nomogramów graficzne ujęcia funkcji obrazują sposób optymalizowania doboru materiałów powłoki i modyfikatora na elementy trące, realizowany poprzez wyznaczanie charakteryzujących je parametrów swobodnej energii powierzchniowej zamiast długotrwałych badań tribologicznych, w odniesieniu do dwóch odmian poliamidów modyfikowanych tym samym napełniaczem, ale w różnej ilości, i współpracujących z tymi samymi powłokami. Poprawę współpracy przebadanych skojarzeń materiałowych uzyskano drogą redukcji oddziaływań w strefie tarcia poprzez zmianę stanu energetycznego współpracujących powierzchni: poliamidów, wprowadzając odpowiednie napełniacze, i stali, poprzez pokrywanie jej powłoką PVD. Widoczne są tendencje jakościowe możliwych do uzyskania efektów. Zależności funkcyjne umożliwiają budowanie baz danych dotyczących różnych wariantów skojarzeń materiałowych. Umożliwiają też komputerową optymalizację węzłów tarcia pod kątem wyboru materiałów w celu uzyskania najkorzystniejszych charakterystyk tribologicznych.



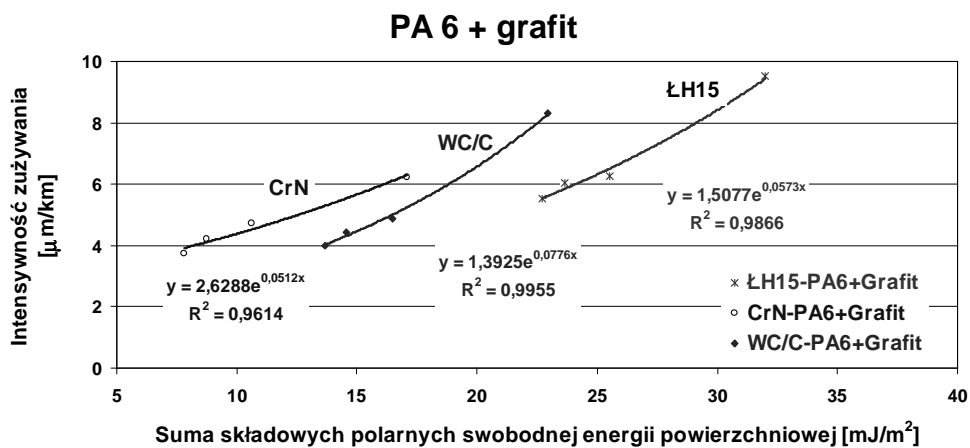
Rys. 2. Zestawienie zależności intensywności zużycia od sumy składowych polarnych dla badanych materiałów i powłok współpracujących z polimerem PA6 i jego kompozycjami z dodatkiem  $\text{MoS}_2$

Fig. 2. Wear intensity versus the sums of the polar components of surface free energy for the tested materials mating PA6 polyamide and PA6 polyamide modified with  $\text{MoS}_2$



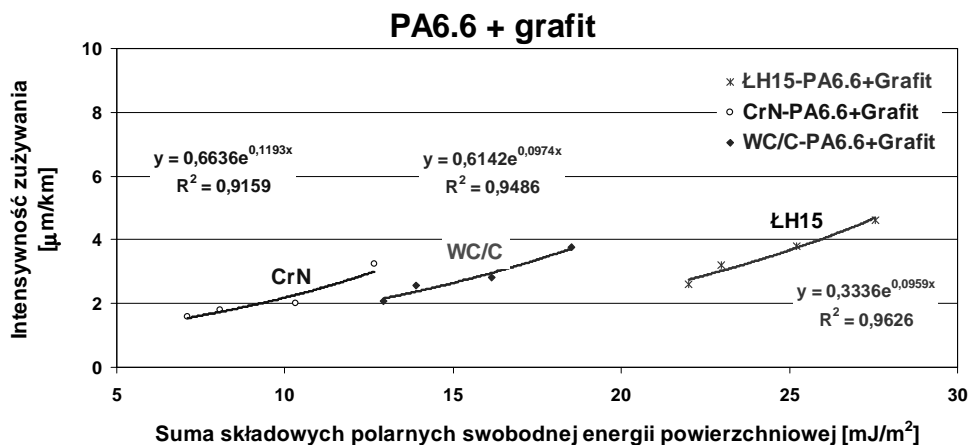
Rys. 3. Zestawienie zależności intensywności zużycia od sumy składowych polarnych dla badanych materiałów i powłok współpracujących z polimerem PA6.6 i jego kompozycjami z dodatkiem MoS<sub>2</sub>

Fig. 3. Wear intensity versus the sums of the polar components of surface free energy for the tested materials mating PA6.6 polyamide and PA6.6 polyamide modified with MoS<sub>2</sub>



Rys. 4. Zestawienie zależności intensywności zużycia od sumy składowych polarnych dla badanych materiałów i powłok współpracujących z polimerem PA6 i jego kompozycjami z dodatkiem grafitu

Fig. 4. Wear intensity versus the sums of the polar components of surface free energy for the tested materials mating PA6 polyamide and PA6 polyamide modified with graphite



Rys. 5. Zestawienie zależności intensywności zużycia od sumy składowych polarnych dla badanych materiałów i powłok współpracujących z polimerem PA6.6 i jego kompozycjami z dodatkiem grafitu

Fig. 5. Wear intensity versus the sums of the polar components of surface free energy for the tested materials mating PA6.6 polyamide and PA6.6 polyamide modified with graphite

#### 4. Wnioski

Dotychczasowe prace badawcze dotyczące udoskonalania materiałów polimerowo-metalowych węzłów tarcia dotyczyły polimerów. Zrealizowane w ramach projektu badania wykazały możliwość uzyskania znaczącego postępu w rozwoju materiałowej inżynierii polimerowo-metalowych węzłów tarcia, głównie przez wykorzystanie nowych możliwości technologicznych wobec metalowego partnera tarcia, którym jest przeważnie stal. Możliwości te stwarzają dynamicznie rozwijające się technologie nakładania cienkich powłok (głównie: PVD, CVD) o grubości rzędu 1  $\mu\text{m}$ , trwale związanych z podłożem. Umożliwiają one kształtowanie żądanych właściwości powierzchniowych elementu stalowego, przy zachowaniu uzyskanych, w wyniku rozwoju techniki, cech stali jako tworzywa konstrukcyjnego.

Zrealizowane w ramach projektu badania potwierdziły możliwość znaczącego poprawienia charakterystyk polimerowo-metalowych węzłów tarcia poprzez skorelowany ze sobą dobór: 1. rodzaju polimeru, 2. modyfikującego jego właściwości napełniacza, a także 3. rodzaju powłoki nakładanej na element metalowy.

## Literatura

- [1] Rymuza Z., *Trybologia polimerów ślizgowych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 1986.
- [2] Polak A., *Przenoszenie materiału w łożysku ślizgowym stal-tworzywo sztuczne*, Monografia, Politechnika Krakowska 1998.
- [3] Ziemiański K., *Zastosowanie Tworzyw sztucznych w budowie maszyn*, Politechnika Wroclawska, Wrocław 1995.
- [4] Przepiórka J., Szczerek M., *The modification of metal-polymer friction pair*, World Tribology Congress II, Wiedeń 2001
- [5] Przepiórka J., Szczerek M., *A new approach to optimization of the metal-polymer tribology characteristics*, World Tribology Congress III, Waszyngton 2005
- [6] Grundmeier G., Stratmann M., *Adhesion and De-adhesion Mechanisms at Polymer/Metal interfaces*, Annual Review of Material Research. Max-Planck Institute for Iron Research. Vol. 35, 2005