

Piotr DUDA\*, Marek BARA\*\*, Sławomir KAPTACZ\*\*\*

**WPLYW NAPROMIENIOWANIA WIĄZKĄ  
ELEKTRONÓW NA CHARAKTERYSTYKI  
TRIBOLOGICZNE PTFE, POM I PA  
W SKOJARZENIU Z ANODOWĄ POWŁOKĄ  
TWARDĄ**

**THE EFFECT OF ELECTRON BEAM IRRADIATION ON  
TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF PTFE, POM,  
AND PA IN COMBINATION WITH AN ANODIC-OXIDE  
COATINGS**

**Słowa kluczowe:**

tarcie, zużycie, warstwa tlenkowa, polimery, napromieniowanie elektronami

**Key words:**

friction, wear, oxide coating, polymers, electron beam irradiation

---

\* Uniwersytet Śląski, Wydział Informatyki i Nauki o Materiałach, ul. Będzińska 39, 41-200 Sosnowiec, tel. (32) 36-89-745, e-mail: piotr.duda@us.edu.pl.

\*\* Uniwersytet Śląski, Wydział Informatyki i Nauki o Materiałach, ul. Śnieżna 2, 41-200 Sosnowiec, tel. (32) 36-89-568, e-mail: marek.bara@us.edu.pl.

\*\*\* Uniwersytet Śląski, Wydział Informatyki i Nauki o Materiałach, ul. Śnieżna 2, 41-200 Sosnowiec, tel. (32) 36-89-503, e-mail: slawomir.kaptacz@us.edu.pl.

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań tribologicznych, stereometrycznych oraz morfologii powierzchni policzterofluoroetyleny (PTFE, Teflon), polioksymetyleny (POM, Delrin) i poliamidu (PA, Nylon) poddanych modyfikacji za pomocą wiązki wysokoenergetycznych elektronów we współpracy z powłoką tlenku aluminium (APT). Celem badań było określenie przydatności wybranych modyfikowanych tworzyw sztucznych do współpracy z wyż. wym. powłokami w niesmarowanych węzłach tarcia. Artykuł stanowi kontynuację zagadnienia dotyczącego współpracy APT z wybranymi tworzywami sztucznymi, stopami żelaza oraz materiałami ceramicznymi. Wyniki badań wykazały, że wybrane materiały zachowują się w różny sposób podczas współpracy tribologicznej z powłoką tlenkową. Zastosowanie zaproponowanej modyfikacji przede wszystkim pogorszyło właściwości tribologiczne wspomnianych tworzyw – głównie intensywność zużywania.

## WPROWADZENIE

Przy konstruowaniu skojarzeń ślizgowych do bezsmarowych węzłów tarcia podstawowym zadaniem jest dobór materiałów o możliwie jak największej odporności na zużywanie przy jednoczesnym zachowaniu jak najmniejszej wartości współczynnika tarcia. Wykorzystanie do współpracy ślizgowej z APT tworzyw konstrukcyjnych o dużo większej twardości i wytrzymałości niż tworzywa sztuczne powoduje najczęściej zmniejszenie się ich zużywania [L. 1]. Takie rozwiązanie mimo swych niewątpliwych zalet powoduje konieczność modyfikacji powłoki tlenkowej smarami stałymi, otrzymując w ten sposób powierzchnię o dużej odporności na nacisk i małej wartości współczynnika tarcia [L. 2]. Nie zawsze w konstrukcji węzłów kinematycznych pożądane jest zastosowanie takich materiałów jak stale czy materiały ceramiczne. Dlatego poszukuje się nowych tworzyw lub modyfikuje obecnie stosowane w celu użycia ich w bezsmarowych węzłach tarcia.

Powłoki tlenkowe są szeroko wykorzystywane w skojarzeniach ślizgowych kinematycznych części maszyn typu tłok–cylinder [L. 3]. Stosując parę APT–polimer, współpraca elementów może odbywać się w warunkach tarcia technicznie suchego. Na początkowym etapie współpracy zachodzi intensywne przenoszenie materiału polimerowego na powierzchnię przeciwróbki. Najpopularniejsze tworzywa sztuczne w swojej niemodyfikowanej postaci cechują się albo nieakceptowaną wartością zużycia bądź niestabilną i wysoką wartością współczynnika tarcia [L. 4]. Dlatego też nie powinno się ich stosować w bezsmarowych węzłach tarcia. Modyfikacja tworzyw sztucznych przeznaczonych na skojarzenia ślizgowe powinna znacznie zmniejszyć ich intensywność zuży-

wania oraz wyeliminować lub znacząco zmniejszyć procesy ściernie zachodzące na etapie docierania wężła ślizgowego.

Oddziaływanie promieniowania elektronowego z materią polega głównie na przekazywaniu energii elektronów wnikających w modyfikowany materiał [L. 5]. W efekcie tego w modyfikowanym materiale powstają wzbudzone atomy lub jony dodatnie i wolne elektrony. Prowadzi to do reakcji powodujących zmiany struktury materiału napromienianego i do powstawania produktów wtórnych. Ze względu na rodzaj polimeru i skutki oddziaływania promieniowania elektronowego można wyróżnić następujące efekty: sieciowanie, degradację oraz odporność na działanie promieniowania. W większości polimerów procesy sieciowania i degradacji przebiegają jednocześnie z różną wydajnością [L. 5, 6]. W wielu przypadkach skutkuje to pogorszeniem właściwości fizykochemicznych tworzyw [L. 7].

Celem niniejszej pracy jest ocena wzajemnego oddziaływania powierzchni anodowej powłoki twardej z polimerami (POM, PA i PTFE) modyfikowanymi wiązką elektronów w warunkach tarcia technicznie suchego.

## **OBIEKTY BADAWCZE**

Jako podłoże do wytworzenia anodowej powłoki twardej (APT) wykorzystano krążki ze stopu EN AW-5251. Wyboru tego stopu dokonano ze względu na dobre właściwości mechaniczne oraz znikomą zawartość domieszek. Powierzchnie krążków przed procesem anodowania były trawione w roztworach KOH oraz HNO<sub>3</sub> celem oczyszczenia powierzchni z zabrudzeń.

Proces anodowania był prowadzony przy stałym ładunku elektrycznym 180 A·min, gęstości prądu 3 A/dm<sup>2</sup> na powierzchni 2,62×10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>. W trakcie utleniania utrzymywano stałą temperaturę elektrolitu trójskładnikowego, która wynosiła 303 K. Budowę i morfologię tak powstałej warstwy tlenkowej opisano w literaturze [L. 1, 4].

Do współpracy z powłoką tlenkową wykorzystano kulki o średnicy 1×10<sup>-2</sup> m wykonane z PTFE, POM i PA, wyprodukowane przez firmę DuPont [L. 4], które poddano napromieniowaniu wiązką wysokoenergetycznych elektronów o dawce 26 kGy oraz jej czterokrotności o energii wiązki 10 MeV.

## **METODYKA BADAŃ**

Do przeprowadzenia badań tribologicznych wykorzystano stanowisko T-01 o skojarzeniu kula-tarcza. Charakterystyki tribologiczne były rejestrowane w warunkach tarcia technicznie suchego przy parametrach: poślizgu 0,1 m/s, obciążenia 10 N, drogi tarcia 1000 m. Średnie średnice tarcia wynosiły odpowiednio 24, 32, 48 mm. Wilgotność powietrza utrzymywana była zgodnie

z zaleceniami noty technicznej VAMAS [L. 8], na poziomie  $50\pm 10\%$ , temperatura otoczenia na poziomie  $23^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Obserwację i analizę mikroskopową powierzchni przeprowadzono, korzystając z mikroskopu Nikon MM-40 i systemu cyfrowej analizy obrazu „Micro-Scan”.

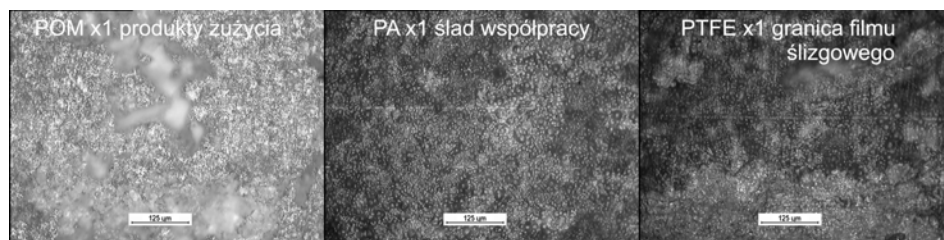
Wyniki intensywności zużywania masowego określono z wykorzystaniem wagi analitycznej WGR60 firmy RADWAG. Natomiast intensywność zużywania objętościowego oraz parametry struktury geometrycznej powierzchni (SGP) próbek określano na podstawie pomiarów wykonanych na profilografometrze stykowym TALYSURF 3D firmy Taylor Hobson.

## WYNIKI BADAŃ

Analizę rezultatów badań tribologicznych rozpoczęto od obserwacji makroskopowej tarcz aluminiowych z warstwą tlenkową po współpracy z badanymi polimerami. Największe różnice obserwowano w przypadku współpracy APT z kulkami z POM, gdzie wraz ze zwiększającą się dawką napromieniowania zwiększała się szerokość ścieżek tarcia. Uwidaczniała to dodatkowo duża ilość produktów zużycia gromadząca się na brzegach śladów tarcia. O pogorszeniu się właściwości tribologicznych POM może dodatkowo świadczyć fakt pęknięcia kulek napromieniowanych czterokrotnie w momencie demontażu ich po teście.

We wszystkich przypadkach zużyciu podlegał głównie materiał próbki polimerowej, czego dowodzą obserwacje mikroskopowe i pomiary stereometryczne. W wyniku współpracy następowało przeniesienie materiału polimerowego na powierzchnię APT i utworzenie filmu ślizgowego. Decydującą formą zużycia w przedstawionych przypadkach było zużywanie ściernego polimeru, o czym świadczy obserwowany rodzaj produktów zużycia.

Analizując zdjęcia mikroskopowe (**Rys. 1**), zaobserwowano na brzegu ścieżki tarcia, w przypadku POM i PTFE, produkty zużycia wraz z filmami ślizgowymi z niewielkimi nieciągłościami. W przypadku PA, gdzie było obserwowane najmniejsze zużycie polimeru, film ślizgowy był nieciągły.

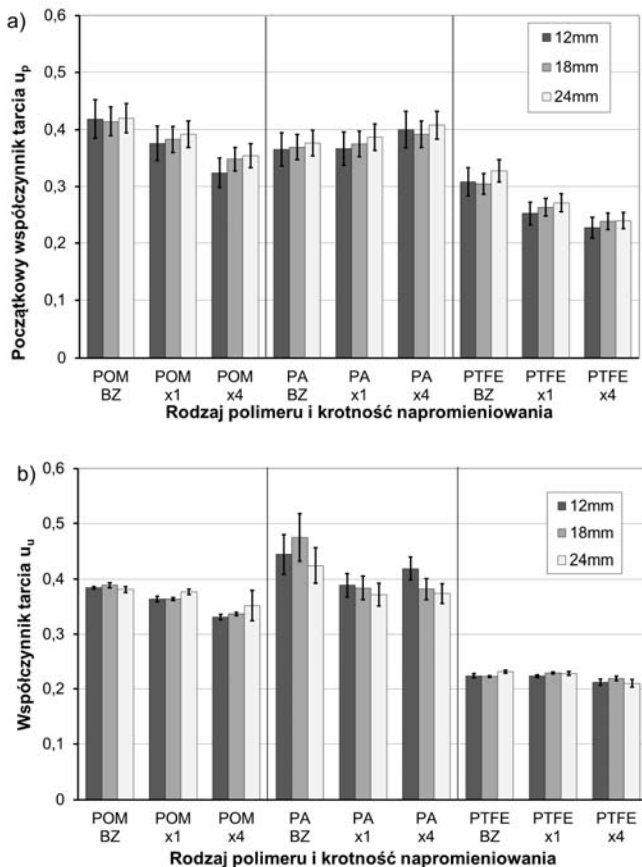


**Rys. 1. Obserwacja mikroskopowa śladu tarcia**

Fig. 1. Microscopic observation of the friction trace

Analizując początkowy współczynnik tarcia –  $\mu_p$  (Rys. 2a), można zauważyć, że w przypadku POM i PTFE wraz ze zwiększającą się dawką napromieniowania jego wartość nieznacznie się zmniejsza, natomiast w przypadku PA nieznacznie wzrasta. Największe różnice między  $\mu_p$  i ustabilizowanym współczynnikiem tarcia –  $\mu_u$  występują dla PTFE, gdzie zanotowano zmniejszenie tego parametru. Nie zaobserwowano natomiast wpływu napromieniowania na wartość  $\mu_u$ . Wpływ średniego promienia ścieżki tarcia w przypadku  $\mu_p$  jest pomijalny.

Duża wartość  $\mu_u$  wraz z dużym rozrzutem (spowodowanym zmiennością rejestrowanej siły tarcia w zakresie  $\pm 20\%$ ) cechowała PA. Tak dużą zmienność siły tarcia zaobserwowano jeszcze pod koniec testu dla POM napromieniowanego czterokrotną dawką. Obrazuje to duża wartość odchylenia standardowego dla tej grupy próbek. Nie stwierdzono jednoznacznego i istotnego wpływu średniego promienia ścieżki na  $\mu_u$  w badanych przypadkach.

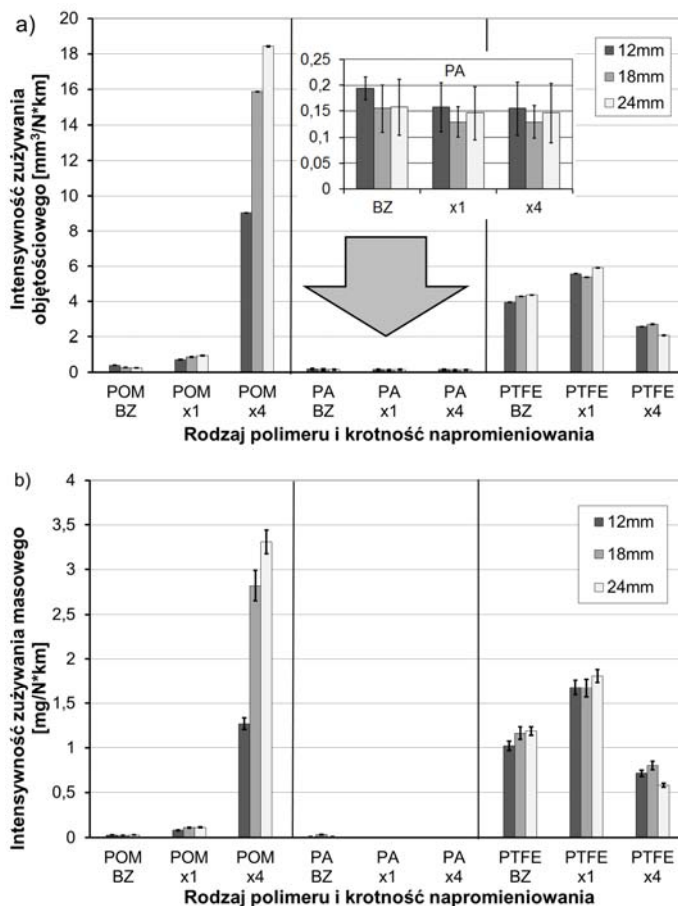


Rys. 2. Początkowy (a) i ustabilizowany współczynnik tarcia (b)

Fig. 2. Initial (a) and stabilized coefficient of friction (b)

Pomiary intensywności zużywania objętościowego (**Rys. 3a**) wykazały, że mimo dużej wartości współczynnika tarcia, PA cechował się najmniejszą wartością intensywności zużywania, na którą nie miał wpływu średni promień ścieżki tarcia i dawka napromieniowania. Potwierdzają to wyniki intensywności zużywania masowego, gdzie wartości mieściły się w granicy oznaczalności przyrządu pomiarowego.

Istotny niekorzystny wpływ poddania polimeru wiązce elektronów obserwowany jest w przypadku POM. Użycie niewielkiej dawki 26 kGy powoduje kilkakrotny wzrost intensywności zużywania. Czterokrotne zwiększenie dawki powoduje tak dużą degradację w materiale, że intensywność zużywania rośnie do nieakceptowalnej wartości  $\approx 20 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{km}$ . Ponadto na intensywność zużywania POM ma wpływ promień drogi tarcia.



**Rys. 3. Intensywność zużywania objętościowego (a) i masowego (b)**

Fig. 3. volumetric wear intensity (a) and mass wear intensity(b)

W przypadku współpracy APT z PTFE modyfikowanym dawką 26 kGy obserwowany jest wzrost intensywności zużywania. W przypadku modyfikacji dawką 104 kGy intensywność zużywania maleje poniżej wartości wyznaczonej dla próbki bazowej.

## WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań wynika jednoznacznie, że modyfikacja polimerów (POM, PA i PTFE) za pomocą wiązki wysokoenergetycznych elektronów nie wprowadziła poprawy charakterystyk tribologicznych do współpracy z APT w postaci znacznego zmniejszenia intensywności zużywania oraz zmniejszenia wartości współczynnika tarcia. Przeprowadzona modyfikacja najmniejszy wpływ miała na PA, natomiast bardzo niekorzystny na POM. Bardzo duża wartość intensywności zużywania rosnąca wraz z krotnością dawki eliminuje ten rodzaj modyfikacji dla POM jako partnera tribologicznego z APT.

Zaobserwowany pozytywny efekt napromieniowania dla PTFE przy zastosowaniu dawki 104 kGy wymaga wyjaśnienia. Stanowić on może podstawę do wykorzystania tej metody dla materiałów kompozytowych opartych na PTFE wykorzystywanych na pierścienie uszczelniające współpracujące z cylindrami pokrytymi APT. Zaplanowano dalsze badania mikromechaniczne i widm EPR celem wyjaśnienia charakterystyk zużyciowych PTFE.

## LITERATURA

1. Bara M., Duda P., Kaptacz S.: Odporność zużyciowa tworzyw konstrukcyjnych współpracujących z powłoką tlenkową. *Tribologia* 4 (2011) 21–32.
2. Nie X., Wang L., Konca E., Alpas A.T.: Tribological behaviour of oxide/graphite composite coatings deposited using electrolytic plasma process. *Surface & Coatings Technology*. 2004, s. 207–213.
3. Pazoła C., Wołodźko J., Wołowicz J.: Badania parametrów pracy i trwałości węzłów uszczelniających stosowanych w siłownikach hydraulicznych. *Hydraulika i Pneumatyka* (3) 2001 28–31.
4. Duda P., Bara M., Kaptacz S.: Ocena odporności zużyciowej tworzyw polimerowych we współpracy z powłoką tlenkową. *Tribologia* 4 (2010) 77–85.
5. Żenkiewicz M.: Wybrane zagadnienia modyfikowania materiałów polimerowych za pomocą promieniowania elektronowego o dużej energii *Polimery* 1 (2005) 4–9.
6. Żenkiewicz M., Czupryńska J.: Wybrane zagadnienia modyfikowania radiacyjnego materiałów polimerowych. Wydawnictwo Akademii Bydgoskiej, Bydgoszcz 2003.
7. Bara M., Skoneczny W., Kaptacz S.: Charakterystyki tribologiczne warstwy Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> modyfikowanej grafitem w skojarzeniu ślizgowym z kompozytami polimerowymi. *Tribologia* 4 (2009) 23–32.
8. Piekoszewski W., Tuszyński W., Szczerek M., Wiśniewski M.: Testowanie tarcia i zużycia materiałów ceramicznych i stali w ramach programu VAMAS. *Tribologia* 138 (1994) 716–728.

### Summary

**In this paper, the authors present the results of tribological and stereometric tests as well as the results of surface morphology of polytetrafluoroethylene, polyoxymethylene, and polyamide subjected to modification with a beam of high energy electrons in collaboration with an aluminium anodic-oxide coating (AOC). The aim of this study was to determine the suitability of the selected modified polymer to work with an anodic oxide coating in non-lubricated friction nodes. The paper is a continuation of an issue related to AOC cooperation with selected polymer, iron alloys, and ceramic materials. The results showed that the selected materials behave differently during tribological cooperation with an oxide coating. A modification with the use of an electron beam deteriorated the tribological properties of these materials, mainly their wear intensity.**