

**Piotr DUDA<sup>\*</sup>, Marek BARA<sup>\*</sup>, Sławomir KAPTACZ<sup>\*</sup>**

## **OCENA ODPORNOŚCI ZUŻYCIOWEJ TWORZYW POLIMEROWYCH WE WSPÓŁPRACY Z POWŁOKĄ TLENKOWĄ**

### **EVALUATION OF WEAR RESISTANCE OF POLYMER MATERIALS IN COOPERATION WITH AN OXIDE COATING**

#### **Słowa kluczowe:**

tarcie, zużycie, właściwości tribologiczne, warstwa tlenkowa, polimery

#### **Key-words:**

friction, wear, tribological properties, oxide coating, polymers

#### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono wyniki badań tribologicznych i stereometrycznych tworzyw polimerowych: POM (Delrin), PTFE (Teflon), PA (Nylon) we współpracy z powłoką tlenku aluminium. Celem badań było określenie przydatności wybranych tworzyw do współpracy z APT (anodową powłoką twardą) w niesmarowanych węzłach tarcia. Wyżej wymienione

---

<sup>\*</sup> Zakład Badań Warstwy Wierzchniej, Katedra Materiałoznawstwa, Wydział Informatyki i Nauki o Materiałach, Uniwersytet Śląski, ul. Śnieżna 2, 41-200 Sosnowiec, tel. (032) 36-89-582.

powłoki zostały wytworzone na stopie aluminium EN AW-5251 metodą elektrochemiczną z elektrolitów trójskładnikowych. Testy tribologiczne przeprowadzono w skojarzeniu kulka–tarcza testera T-01 dla ruchu obrotowego w warunkach tarcia technicznie suchego. Pozostałe parametry badań przyjęto zgodnie z wytycznymi programu VAMAS.

## WPROWADZENIE

Zastosowanie tworzyw polimerowych w niesmarowanych węzłach kinematycznych części maszyn jest coraz częściej spotykanym rozwiązaniem konstrukcyjnym. Dotyczy to w szczególności pneumatycznych urządzeń napędowych, gdzie zastosowanie tworzyw polimerowych do produkcji pierścieni prowadząco-uszczelniających zapewnia długotrwałą, bezawaryjną pracę urządzenia [L. 1]. Zastosowanie powłok tlenkowych na pokrycia aluminiowych cylindrów pneumatycznych urządzeń napędowych jest niezbędnym procesem eliminującym w dużej mierze zjawisko szczytów adhezyjnych, jednakże powoduje intensywne zużywanie tworzywa na pierwszym etapie pracy urządzenia [L. 2]. Procesy zachodzące na etapie docierania węzła ślizgowego są ściśle związane z konstytuowaniem się filmu ślizgowego, co w wielu przypadkach skutkuje pogorszeniem właściwości fizykochemicznych tworzyw polimerowych [L. 3]. Szczególny wpływ na pracę skojarzenia ma zatem odpowiedni dobór niskotarciowych tworzyw polimerowych. Dotychczas powszechnie stosowanym tworzywem do tego typu skojarzeń był policzterofluoroetylen, który dzięki wyjątkowo małej energii powierzchniowej posiada doskonałe właściwości smarujące [L. 4]. W wyniku zastosowania policzterofluoroetyleny do współpracy z powłoką tlenku aluminium następuje zmniejszenie oporów ruchu kosztem znacznego zużycia tworzywa [L. 5].

Celem niniejszej pracy była ocena odporności zużyciowej najpopularniejszych tworzyw polimerowych wykorzystywanych w skojarzeniach ślizgowych niesmarowanych (PTFE, POM, PA). Tworzywa te skojarzono z elementem z anodową powłoką tlenkową wytworzoną metodą elektrochemiczną.

## OBIEKTY BADAŃ

Wszystkich powłoki tlenkowe wytworzono na stopie aluminium EN-AW-5251. Wyboru tego stopu dokonano ze względu na dobre właściwości mechaniczne stopu oraz znikomą zawartość domieszek innych

pierwiastków, co ułatwia powstawanie powłok  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Powłoki zostały wytworzone w kształcie toroidu o powierzchni  $2,62 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  na krążkach o średnicy  $59 \times 10^{-3} \text{ m}$  i grubości  $5 \times 10^{-3} \text{ m}$ . Katodę w procesie utleniania stanowiła płytką wykonana z ołowiu, o wymiarach odpowiadających wymiarom próbek.

Powierzchnie krążków przed procesem utleniania były wytrawiane w 5% roztworze KOH, a następnie pobielane w 10% roztworze  $\text{HNO}_3$  celem odwrócenia reakcji trawienia. Utlenianie odbywało się metodą stałoprądową z użyciem stabilizowanego zasilacza GPR-25H30D. Proces anodowania był prowadzony przy stałym ładunku elektrycznym 180 Amin, stosując gęstość prądową  $3 \text{ A/dm}^2$ . Temperatura elektrolitu podczas całego procesu była stała i wynosiła 303 K. Uzyskane grubości powłok mieściły się w zakresie  $50 \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ .

Próbki stanowiły kulki o średnicy 10 mm, wykonane z tworzyw polimerowych stosowanych w skojarzeniach ślizgowych niesmarowanych w postaci niemodyfikowanej (PTFE, POM, PA) o nazwach handlowych Teflon, Delfin i Nylon. Nylon charakteryzuje się doskonałą odpornością na ścieranie małym współczynnikiem tarcia. Maksymalna wytrzymałość temperaturowa nylonu wynosi około  $100^\circ\text{C}$ . Jest odporny na zwykłe rozpuszczalniki, węglowodory, alkohole o małej mocy oraz aceton. Delrin charakteryzuje się stałą udarnością w szerokim zakresie temperatur: w teście Charpy'ego w temperaturze pokojowej wynosi  $10,5 \text{ kJ/m}^2$ . Posiada wysoką twardość, dużą odporność na ścieranie, niski współczynnik tarcia oraz odporność na odkształcenia plastyczne i działanie chemikaliów. Jako materiał odniesienia zastosowano niemodyfikowany policzterofluoretylen (Teflon).

## STANOWISKO I METODYKA BADAŃ

Do badań wykorzystano stanowisko typu kula-tarcza T-01 (produkcji ITeE – PIB) ze względu na proste próbki oraz możliwość dokładnego określenia: siły tarcia i zużycia liniowego elementów testowych. Badania tribologiczne przeprowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego przy następujących parametrach styku: prędkość poślizgu 0,1 m/s, obciążenie 10 N, droga tarcia 1000 m. Średnia średnica tarcia wynosiła odpowiednio 24, 32, 48 mm. Wilgotność powietrza w laboratorium utrzymywano zgodnie z zaleceniami noty technicznej VAMAS [L. 6, 7, 8], na poziomie  $50 \pm 10\%$ , a temperaturę otoczenia na poziomie  $23^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ .

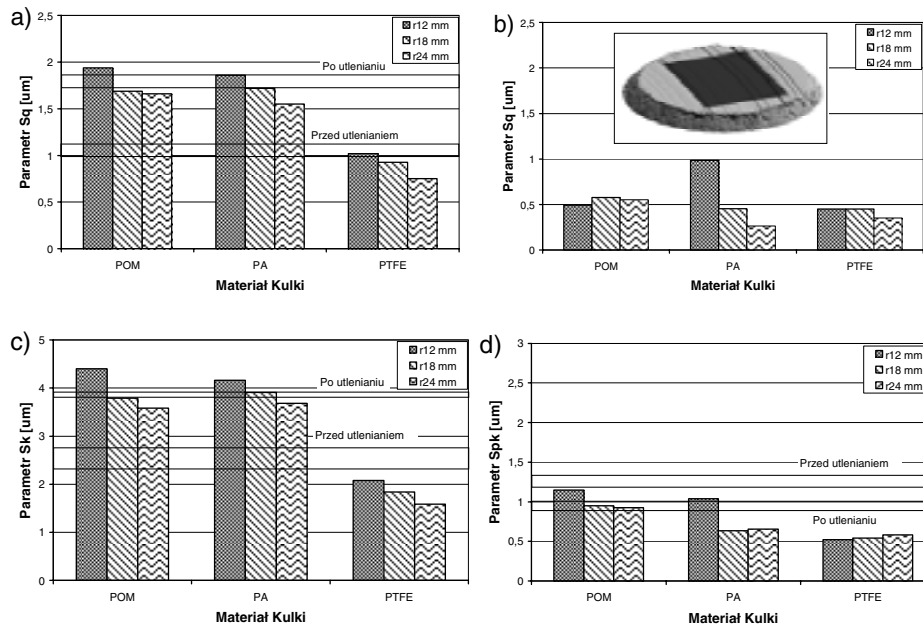
Zużycie objętościowe kulek oraz parametry struktury geometrycznej powierzchni SGP próbek po testach tribologicznych określano na podstawie pomiarów wykonanych na profilografometrze stykowym TALYSURF 3D firmy Taylor Hobson. Pomiary zużycia masowego określano z wykorzystaniem wagi analitycznej WGR60 firmy RADWAG.

## WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Analizie stereometrycznej poddano wszystkie elementy węzła tarcia. Wartości parametrów stereometrycznych tarcz, ze względu na zachowanie identycznych warunków technologicznych, zostały uśrednione i przedstawione na wykresach w formie zakreskowanych obszarów (**Rys. 1 a, c, d**). Uzyskane wyniki wykazują zmianę parametrów struktury geometrycznej powierzchni – SGP (średnie kwadratowe odchylenie profilu powierzchni –  $S_q$ , wysokość rdzenia –  $S_k$ , zredukowana wysokość wzniesień –  $S_{pk}$ ).

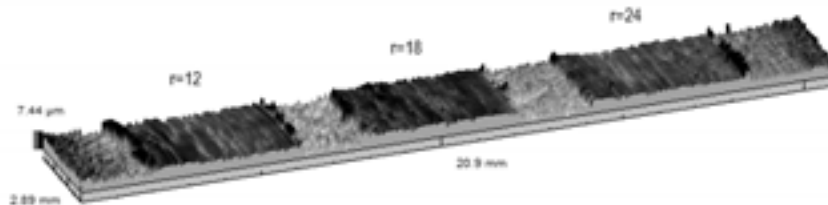
W przypadku tarcz zmiany chropowatości rozpoczęły się po utlenianiu, w wyniku którego parametry  $S_q$  i  $S_k$  zwiększyły swoją wartość, natomiast  $S_{pk}$  zmalał. Po procesie tarcia na przeciwpróbkach ukonstytuował się film ślizgowy (**Rys. 2**), którego obecność potwierdzają zmiany parametrów SGP. Największą zmianę parametrów  $S_q$  i  $S_k$  zaobserwowano w przypadku tarcz współpracujących z PTFE, gdzie ich wartości zmniejszyły się dwukrotnie w stosunku do powierzchni po utlenieniu, natomiast przy tarczach współpracujących z pozostałymi tworzywami nie zaobserwowano znaczących zmian. Zwiększenie promienia drogi tarcia w każdym przypadku wywołało zmniejszenie wartości obu parametrów. Parametr  $S_{pk}$  zmniejszył swoją wartość w wyniku utleniania. Podobnie w przypadku powłok współpracujących z PTFE jego wartość zmniejszyła się po procesie tarcia.

Pomiary i analiza stereometryczna powierzchni kulek posłużyły do wyznaczenia zużycia objętościowego oraz określenia średniego kwadratowego odchylenia profilu (**Rys. 1 d**). Zaobserwowano mniejsze wartości  $S_q$  w porównaniu z tarczami. Nie stwierdzono istotnych różnic w przypadku POM i PTFE, natomiast w przypadku PA wartości  $S_q$  odzwierciedlają zmianę promienia drogi tarcia.



**Rys. 1. Parametry struktury geometrycznej powierzchni; a) średnie kwadratowe odchylenie profilu powierzchni przeciwpróbki, b) średnie kwadratowe odchylenie profilu powierzchni próbki, c) wysokość rdzenia próbki, d) zredukowana wysokość wzniesień próbki**

Fig. 1. The parameters of surface geometrical structure; a) root mean square of the surface; a) root-mean-square deviation of the surface specimen, b) root mean square height of the surface; a) root-mean-square deviation of the surface counterspecimen, c) core roughness depth, d) reduced summit height

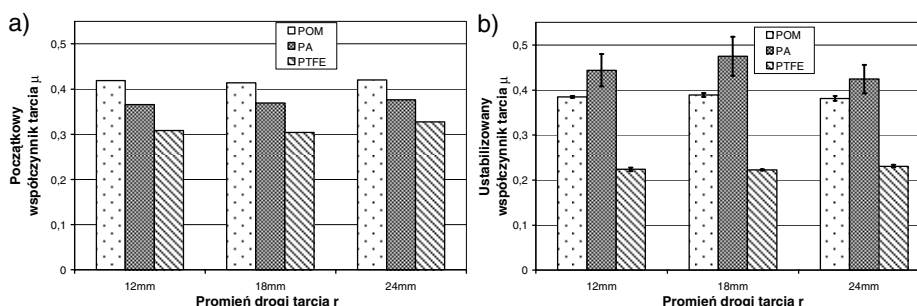


**Rys. 2. Obraz izometryczny 3D powłoki tlenkowej po współpracy ślizgowej z PTFE**

Fig. 2. 3D isometric image the oxide coating after a sliding interaction with PTFE

Współczynnik tarcia, który jest jednym z najważniejszych parametrów tribologicznych, różni się znacząco dla początkowego etapu współpracy (etap docierania) oraz ustabilizowanych warunków tarcia. Przyczy-

ną różnic wydaje się być przede wszystkim zmiana geometrii styku z punktowego, cechującego się dużymi naprężeniami hertzowskimi do styku rozłożonego, z szybko malejącymi naprężeniami kontaktowymi. Promień tarcia nie miał wpływu na wartości współczynnika tarcia uzyskane na początkowym etapie współpracy (**Rys. 3a**). Jak przewidywano, najniższą wartość współczynnika tarcia uzyskano dla Teflonu współpracującego z warstwą tlenkową. Skojarzenie APT z Delrinem na początkowym etapie badań cechowało się największą wartością współczynnika tarcia, mimo że jego ustabilizowana wartość była znacznie niższa niż uzyskana dla skojarzenia z poliamidem.



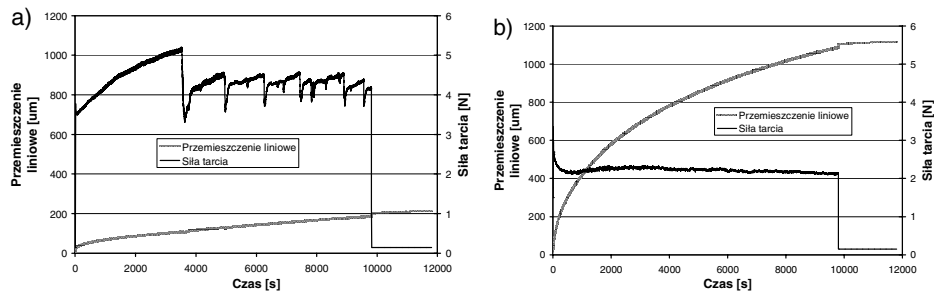
**Rys. 3. Początkowy (a) i ustabilizowany współczynnik tarcia (b)**

Fig. 3. Initial (a) and stabilized friction coefficient (b)

Różnice w ustabilizowanym współczynniku tarcia, a szczególnie odchylenia standardowe dają się zinterpretować dopiero po analizie szczegółowej przebiegu siły tarcia (**Rys. 4**). Zaobserwowane dla Delrinu (POM) i Teflonu (PTFE) nie różnią się znacząco. Na początkowym etapie następuje wzrost wartości siły tarcia, która następnie maleje do wartości ustabilizowanej. Charakterystyka w tym przedziale aż do końca testu nie zmienia się już znacząco mimo rosnącej powierzchni współpracy między partnerami tribologicznymi (**Rys. 4 b**).

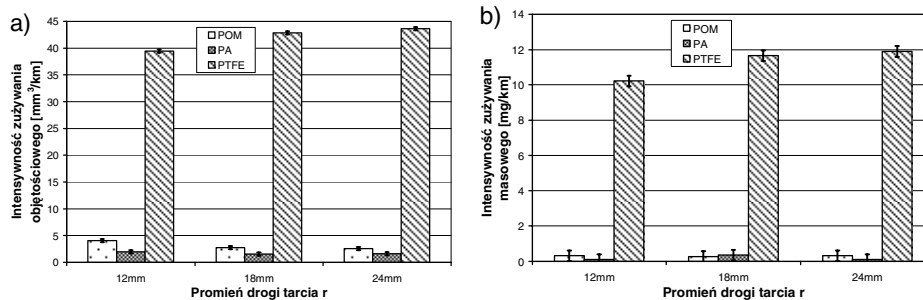
Bardziej niekorzystne zjawiska zaobserwowano dla poliamidu (Nylonu). Po zmianach, jakie zachodzą na początkowym etapie współpracy wartość siły tarcia rośnie. Po osiągnięciu wartości ponad 5 N (współczynnika tarcia 0,5) nastąpiło znaczne zmniejszenie się wartości o ponad 30% (**Rys. 4a**). Przyczyny takiego zachowania należy upatrywać w zjawiskach cieplnych, jakie zachodzą między partnerami tribologicznymi. Wzrost wartości współczynnika tarcia, który następuje po ukonstytuowaniu się filmu ślizgowego, powoduje większe wydzielanie się ciepła

w strefie styku. Po osiągnięciu punktu krytycznego dochodzi do zmniejszenia udziału zjawisk adhezyjnych w strefie tarcia, a siła tarcia znacznie obniża swoją wartość. Zjawiska te obserwowane są na szczegółowym wykresie zmian wymiaru liniowego elementów węzła tarcia. Zaraz po osiągnięciu wartości maksymalnej następuje zwiększenie się wymiaru liniowego o około  $10\ \mu\text{m}$ . Zjawisko to powtarza się cyklicznie i jest obserwowane do końca testu tribologicznego. Zaobserwowanym zmianom nie towarzyszą rejestrowalne zmiany akustyczne i efekty wizualne. Precyzyjniejszemu wyjaśnieniu tego zjawiska pomogłyby obrazy termograficzne węzła tarcia.



**Rys. 4. Przykładowe charakterystyki dla: a) PA (Nylonu), b) PTFE (Teflonu)**

Fig. 4. Exemplary characteristics for: a) PA (Nylon), b) PTFE (Teflon)



**Rys. 5. Intensywność zużycia objętościowego (a) i masowego (b)**

Fig. 5. Volumetric wear intensity (a) and mass wear intensity (b)

W inny sposób niż charakterystyki tarciove prezentują się charakterystyki zużyciowe. Należy tu podkreślić, że intensywność zużycia masowego (**Rys. 5 b**) nie jest najlepszą metodą z dwóch powodów: po pierwsze prezentowane tworzywa różniły się gęstością o prawie 40%

oraz wartości zużycia masowego dla Nylonu i Delrinu były w granicy rejestrowalności przez wykorzystywaną do pomiarów wagę analityczną. Na podstawie pomiarów stereometrycznych próbek dokonano pomiarów intensywności zużywania objętościowego (**Rys. 5 a**). Wykonane za pomocą tej metody pomiary wykazały, że największą wartością zużycia cechowały się próbki z Teflonu. Zużycie tego polimeru było ponaddziesięciokrotnie większe niż dla dwóch pozostałych tworzyw. Poliamid cechował się najmniejszą intensywnością zużywania, niezależną od promienia drogi tarcia. Prawie dwukrotnie większe wartości uzyskano dla Delrinu, dla którego współczynnik intensywności malał z rosnącą wartością promienia drogi tarcia. Natomiast odwrotną tendencję zaobserwowano dla policzterofluoroetyleny.

### PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały, że najpopularniejsze tworzywa sztuczne w swej niemodyfikowanej postaci nie nadają się do zastosowań w węzłach bezsmarowych. Policzterofluoroetylen cechował się największą i nieakceptowaną wartością zużycia, natomiast poliamid miał bardzo wysoki współczynnik tarcia oraz bardzo niestabilną jego wartość. Również wartość współczynnika tarcia dla poliacetalu była zbyt wysoka. Wykorzystanie tych tworzyw będzie jednak możliwe po ich modyfikacji bądź jeśli będą stanowiły osnowę materiału kompozytowego. Zastosowanie poliacetalu i poliamidu jako osnowy nowych tworzyw byłoby bardziej korzystne ze względu na stereometrię powierzchni utlenionej konstytuowaną podczas tarcia, gdyż dla tych materiałów uzyskano cieńszy film ślizgowy, a wartości parametrów  $S_q$ ,  $S_k$  i  $S_{pk}$  były nieznacznie mniejsze niż dla powierzchni tlenkowych przed procesem tarcia.

### LITERATURA

1. Pazoła C., Wołodźko J., Wołowicz J.: *Hydraulika i Pneumatyka*, 2001, nr 3, s. 28–31.
2. Polak A.: *Seria Mechanika*, Kraków, 1998.
3. Rymuza Z.: *Wydawnictwo Naukowo-Techniczne*, Warszawa 1986.
4. Wieleba W.: *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 2002.
5. Kmita T., Skoneczny W.: *Tribologia* 2005, 5, s. 81–94.



6. Czichos H., Becker S., Lexow J.: Multilaboratory tribotesting: results from the Versailles Advanced Materials and Standards Programme on Wear Test Methods. *Wear*. 1987, t. 114, s. 109–130.
7. Czichos H., Becker S., Lexow J.: International multilaboratory sliding wear tests with ceramics and steel. *Wear*. 1989, t. 135, s. 171–191.
8. Piekoszewski W., Tuszyński W., Szczerek M., Wiśniewski M.: Testowanie tarcia i zużycia materiałów ceramicznych i stali w ramach programu VAMAS. *Tribologia*. 1994, t. 138, s. 716–728.

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

### Summary

**This paper presents the tribological and stereometric research of polymer materials: POM (Delrin), PTFE (Teflon), PA (Nylon) in cooperation with the oxide aluminium alloy. The purpose of the study was to determine the suitability of chosen materials to work with the AHC (anodic hard coating) in applications to technically dry friction condition nodes. These coatings have been obtained on the aluminium alloy EN-AW-5251 using an electrochemical process. Tribological tests were carried out on ball-on-disk T-01 testing machine (disk rotating) in dry friction conditions. Other test parameters are considered in accordance with the VAMAS program guidelines.**