

Joanna KORZEKWA\*

## CHARAKTERYSTYKI TRIBOLOGICZNE PARY ŚLIZGOWEJ: WARSTWA $Al_2O_3/WS_2$ –TWORZYWO SZTUCZNE PEEK/BG

### TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SLIDING COUPLE: $Al_2O_3/WS_2$ COATINGS–PEEK/BG PLASTIC

#### Słowa kluczowe:

właściwości tribologiczne, powłoka tlenkowa aluminium, dwusiarczek wolframu

#### Key words:

tribological properties, aluminium oxide coating, tungsten disulfide

#### Streszczenie

Celem artykułu jest przedstawienie wyników badań tribologicznych skojarzenia warstwa tlenkowa  $Al_2O_3$  modyfikowana  $WS_2$  z tworzywem sztucznym PEEK/BG. Analizowane właściwości tribologiczne obejmują wyniki badań intensywności zużywania materiału PEEK/BG, pomiary współczynnika tarcia węzła ślizgowego oraz wyniki parametrów struktury geometrycznej powierzchni warstw  $Al_2O_3/WS_2$ . Wykazano, że dla skojarzeń tworzywa PEEK/BG z warstwami  $Al_2O_3/WS_2$ , wytworzonymi w czasie 60 i 80 minut (przy zachowa-

---

\* Uniwersytet Śląski, Katedra Materiałoznawstwa, 41-200 Sosnowiec, ul. Śnieżna 2,  
e-mail: joanna.korzekwa@us.edu.pl.

niu stałej gęstości ładunku elektrycznego  $240 \text{ A}\cdot\text{min}/\text{dm}^2$ ), współczynnik tarcia jest niższy niż dla skojarzenia tworzywa PEEK/BG z  $\text{Al}_2\text{O}_3$  niemodyfikowaną. Na podstawie badań profilografometrycznych wykazano, że warstwy  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WS}_2$  otrzymywane przy stałej gęstości ładunku elektrycznego  $240 \text{ A}\cdot\text{min}/\text{dm}^2$  posiadają korzystne parametry SGP dla powierzchni ślizgowych.

## WPROWADZENIE

Warstwy tlenkowe wytwarzane na podłożu stopów aluminium od lat znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym czy spożywczym. Oksydowanie aluminium ma zazwyczaj na celu nadanie mu własności dekoracyjnych, ochronę powierzchni przed korozją, zwiększenie jej twardości oraz odporności na zużycie wywołane tarcie [L. 1–4].

Z punktu widzenia zastosowania stopów aluminium na elementy kinematycznych części maszyn (np. siłowniki, tłoki), wymagane jest, aby warstwę tlenkową cechowała duża adhezja do podłoża. Jedną z metod dających tę możliwość, jest metoda elektrochemicznego utleniania aluminium z powodzeniem stosowana zarówno na skalę przemysłową, jak również w pracach jednostek naukowo-badawczych. Celem poprawy właściwości tribologicznych warstw poszukuje się m.in. możliwości modyfikacji warstw już w procesie wytwarzania oraz bada wpływ tej modyfikacji na właściwości zużywania podczas eksperymentalnych badań eksploatacyjnych.

Niniejszy artykuł przedstawia wyniki badań tribologicznych i stereometrycznych pary ślizgowej tworzywo PEEK/BG z modyfikowaną warstwą  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Modyfikację przeprowadzono na etapie wytwarzania poprzez wprowadzenie do elektrolitu  $\text{WS}_2$ . Celem dokładniejszego scharakteryzowania węzła ślizgowego PEEK/BG- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WS}_2$  modyfikację warstw przeprowadzono przy zastosowaniu różnych parametrów wytwarzania (czas procesu 60, 80, 120 min.; temperatura elektrolitu 298, 303 K).

## MATERIAŁ BADAŃ

Warstwy tlenkowe wytworzono metodą anodowania twardego na powierzchni  $0,1 \text{ dm}^2$  stopu aluminium (EN-AW-5251). Elektrolizę przeprowadzono w wodnym roztworze kwasów: siarkowego, szczawiowego i ftalowego oraz w wodnym roztworze tych kwasów z dodatkiem 30 g proszku  $\text{WS}_2$  (Aldrich – Sigma, rozmiar ziarna  $< 2 \mu\text{m}$ ) na litr elektrolitu. W celu zapewnienia jednorodności zawiesiny i przeciwdziałania osadzaniu proszku  $\text{WS}_2$  zastosowano mieszanie mechaniczne podczas procesu elektrolizy. Warstwy wytworzono przy stałej gęstości ładunku elektrycznego wynoszącej  $240 \text{ A}\cdot\text{min}/\text{dm}^2$ . Warunki procesu przedstawiono w Tabeli 1.

Partnerem tribologicznym w skojarzeniach z warstwami było tworzywo sztuczne – polieteroeteroketon z dodatkiem PTFE, grafitu i włókien węglowych – PEEK/BG.

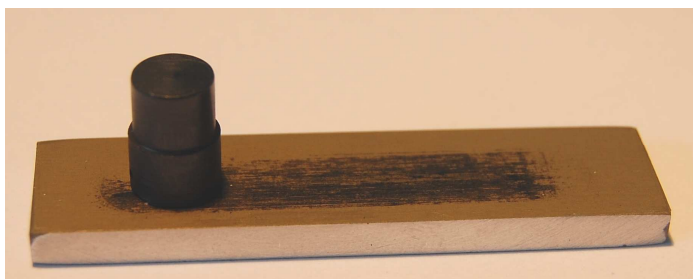
**Tabela 1. Warunki wytwarzania warstw**

Table 1. The conditions of coatings production

Oznaczenie warstw	Zawartość WS <sub>2</sub> w 1 l elektrolitu [g]	Temperatura elektrolitu [K]	Czas anodowania [min]
A	0	298	60
B	0	303	60
C	30	298	120
D	30	298	80
E	30	298	60
F	30	303	120
G	30	303	80
H	30	303	60

## METODYKA BADAŃ

Testy tribologiczne przeprowadzono na testerze T17 typu trzpień–płytką (**Rys. 1**) w ruchu posuwisto-zwrotnym, w temperaturze pokojowej, przy wilgotności powietrza  $30\pm 5\%$ . Zastosowano obciążenie 0,5 MPa, przy średniej prędkości poślizgu 0,2 m/s. Testy prowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego na drodze 15 km. Intensywność zużycia tworzywa sztucznego PEEK/BG określono przy użyciu wagi analitycznej. Pomiary SGP warstw tlenkowych wykonano profilografem stykowym Talysurf 3D Taylor Hobson z dokładnością 2%. Wyniki parametrów opracowano przy użyciu oprogramowania Talymap Universal 3D. Analizę stereometryczną przeprowadzono na powierzchni 2 mm x 2 mm.



**Rys. 1. Rodzaj styku próbki i przeciwpróbki podczas badań tribologicznych na testerze T17**

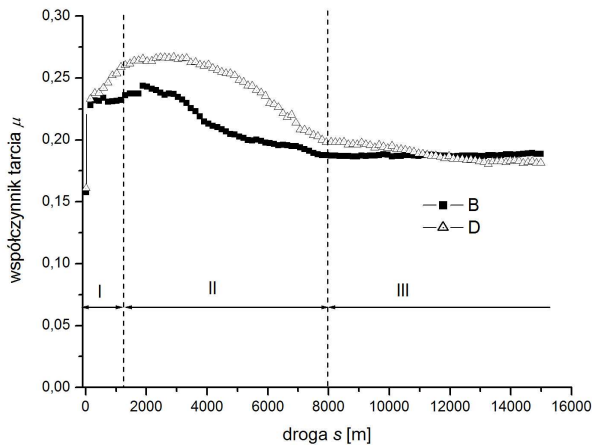
Fig. 1. Type of contact of the sample and the counter specimen during tribological tests for T17 tester

## WYNIKI BADAŃ

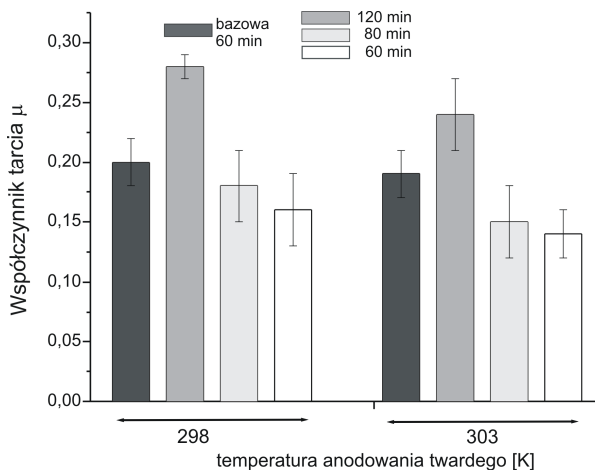
Dla badanych skojarzeń liniowe zależności współczynników tarcia w funkcji drogi tarcia (**Rys. 2**) podzielono zgodnie z [L. 6] na trzy obszary:

- I – przejścia tarcia statycznego w tarcie kinetyczne,
- II – docierania,
- III – tarcia ustabilizowanego (zakres prostoliniowy).

Do porównania wartości współczynników tarcia wybrano zakresy charakteryzujące obszar tarcia ustabilizowanego (obszar III). Wyniki tego porównania przedstawiono na **Rys. 3**.



**Rys. 2. Liniowe zależności współczynników tarcia w funkcji drogi tarcia dla próbek B i D**  
Fig. 2. Linear dependence of friction coefficients as a function of the way for samples B i D



**Rys. 3. Wykres zależności współczynnika tarcia od temperatury anodowania twardego**  
Fig. 3. Diagram of the friction coefficient as a function of temperature of hard anodizing

Z powyższego wykresu wynika, że niższe wartości współczynnika tarcia w porównaniu ze skojarzeniem z warstwą tlenkową  $\text{Al}_2\text{O}_3$  niemodyfikowaną, uzyskały skojarzenia z warstwami  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WS}_2$  otrzymywanymi w czasach elektrolizy wynoszącej 80 i 60 min, zarówno dla temperatury 298, jak i 303 K. Anodowanie twarde przeprowadzone dla niższych wartości gęstości prądu anodowania  $2 \text{ A/dm}^2$ , zachowując stałą gęstość ładunku elektrycznego wynoszącego  $240 \text{ A}\cdot\text{min/dm}^2$ , wymaga wydłużenia czasu elektrolizy do 120 minut. Z ekonomicznego punktu widzenia korzystniej zastosować wyższe wartości gęstości prądu anodowania 3 lub  $4 \text{ A/dm}^2$ , odpowiednio skracając czas procesu do 80 i 60 minut. Z przedstawionego wykresu (**Rys. 3**) wynika również fakt, że obniżeniu wartości współczynnika tarcia badanej pary ślizgowej sprzyja podwyższenie temperatury procesu elektrolizy do 303 K.

W **Tabeli 2** zestawiono wartości współczynników tarcia oraz wartości intensywności zużywania tworzywa sztucznego PEEK/BG. Współczynniki tarcia wyliczone zostały dla zakresów ustabilizowanych, różne zatem były wartości intensywności zużywania się tworzywa PEEK/BG. Przykładowo, skojarzenie warstwa F–tworzywo PEEK/BG charakteryzował współczynnik tarcia wynoszący 0,24, przy intensywności zużywania tworzywa PEEK/BG wynoszącej  $0,19 \text{ mg/km}$ . W tym przypadku czas docierania był bardzo długi, poprzedzony dodatkowym maksimum w obszarze II. Tym samym otrzymano wyższą wartość intensywności zużywania materiału PEEK/BG. Podobnie można wyjaśnić wyniki testu dla skojarzenia: warstwa H–tworzywo PEEK/BG, dla którego używano znaczące zużycie tworzywa wynoszące  $0,15 \text{ mg/km}$ . Skojarzenie to charakteryzowało się jednak niską wartością współczynnika tarcia  $\mu = 0,14$

**Tabela 2. Wartości współczynników tarcia pary trącej  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WS}_2$ –PEEK/BG oraz intensywności zużywania materiału PEEK/BG**

Table 2. The values of friction coefficients of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WS}_2$ –PEEK/BG friction pair and the intensity of wear of the PEEK/BG material

Oznaczenie warstw	Współczynnik tarcia $\mu$	Intensywność zużywania PEEK/BG [mg/km]
A	0,2	0,07
B	0,28	0,23
C	0,18	0,04
D	0,16	0,07
E	0,19	0,03
F	0,24	0,19
G	0,15	0,07
H	0,14	0,15

w obszarze tarcia ustabilizowanego. Niski współczynnik tarcia w tym przypadku można wytłumaczyć wytworzeniem dostatecznie grubej warstwy smarnej złożonej zarówno z tworzywa PEEK/BG, jak również cząstek smaru stałego  $WS_2$ , stanowiącego modyfikator warstwy  $Al_2O_3$ . Tak utworzony film ślizgowy o odpowiednio niskiej wartości naprężenia jednostkowego  $\sigma_T$  obniżył znacząco współczynnik tarcia  $\mu$  [L. 7].

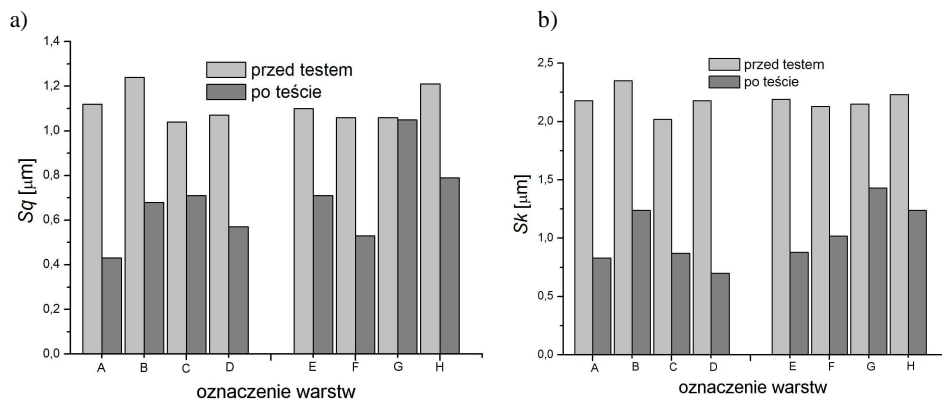
**Tabela 3** przedstawia wartości parametrów amplitudowych SGP warstw  $Al_2O_3/WS_2$  przed i po współpracy tribologicznej z materiałem PEEK/BG. Parametr  $Sq$ , oddający charakter nierówności powierzchni, jest czuły na pojedyncze wgłębienia i wzniesienia. Zgodnie z wynikami przedstawionymi na **Rys. 4a** zaobserwowano zmniejszenie wartości chropowatości powierzchni po współpracy tribologicznej dla wszystkich badanych warstw, niezależnie od warunków elektrolizy. Analiza parametrów  $Sp$  i  $Sv$  lub  $Sp$  i  $Sz$  daje informację o kształcie profilu oraz pozwala wnioskować na temat odporności badanej powierzchni na ścieranie. Ponieważ stosunek  $Sp/Sz \ll 0,5$  we wszystkich badanych warstwach, zakłada się, iż nierówności powierzchniowe warstw  $Al_2O_3/WS_2$  charakteryzowały się zaokrągleniami wierzchołków, co zwiększa ich odporność na ścieranie [L. 6]. Ujemna skośność badanych warstw (parametr  $Ssk$ ) wskazuje na powierzchnię o charakterze płaskowyżowym [L. 7].

**Tabela 3. Parametry amplitudowe struktury geometrycznej powierzchni próbek przed i po współpracy tribologicznej dla badanych próbek**

Table 3. The amplitude parameters of surface geometrical structure of counter-specimen before and after tribological test for measured counter-specimen

Próbki	Parametry amplitudowe SGP						$Sp/Sz$	Parametry amplitudowe SGP					$Sp/Sz$
	$Sq$ $\mu m$	$Ssk$	$Sp$ $\mu m$	$Sv$ $\mu m$	$Sz$ $\mu m$	$Sq$ $\mu m$		$Ssk$	$Sp$ $\mu m$	$Sv$ $\mu m$	$Sz$ $\mu m$		
	Przed współpracą tribologiczną							Po współpracy tribologicznej					
A	1,12	-1,61	2,4	6,83	9,23	0,26	0,43	-1,76	1,07	3,25	4,32	0,25	
B	1,24	-1,58	2,37	6,56	8,93	0,27	0,68	-1,25	1,79	3,58	5,38	0,33	
C	1,04	-1,64	2,06	6,24	8,3	0,25	0,71	-3,31	1,2	6,05	7,25	0,17	
D	1,07	-1,35	2,96	5,9	8,86	0,33	0,57	-4,16	0,96	5,95	6,91	0,14	
E	1,1	-1,55	2,32	6,61	8,93	0,26	0,71	-3,19	1,12	5,82	6,94	0,16	
F	1,06	-1,52	2,3	6,18	8,48	0,27	0,53	-1,34	1,84	3,18	5,02	0,37	
G	1,06	-1,59	2,21	6,66	8,86	0,25	1,05	-2,2	1,76	6,43	8,12	0,22	
H	1,21	-1,63	2,5	6,74	9,23	0,27	0,79	-2,04	1,25	4,66	5,84	0,21	

$Sq$  – średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni,  $Sa$  – średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości,  $Ssk$  – współczynnik skośności,  $Sp$  – maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni,  $Sv$  – maksymalna głębokość wgłębienia powierzchni,  $Sz$  – dziesięciopunktowa wysokość nierówności powierzchni



**Rys. 4.** Wykresy a) średniego kwadratowego odchylenia chropowatości  $Sq$ , b) wysokości chropowatości rdzenia dla badanych próbek, przed i po współpracy tribologicznej

Fig. 4. Diagrams a) of the mean square deviation of  $Sq$ , b) of the core valley height  $Sk$  for measured counter-specimen, before and after tribological test

W Tabeli 4 przedstawiono parametry krzywej Abbotta-Firestone'a. Parametr  $Sk$  opisuje nominalną chropowatość powierzchni (wysokość chropowatości rdzenia). Zgodnie z jego wartościami (Rys. 4b) można założyć, iż wyjściowe powierzchnie warstw były porównywalne. Po teście tribologicznym wartość parametru  $Sk$  znacznie się obniżyła dla wszystkich powierzchni. Wygładzenie powierzchni po współpracy tribologicznej związane jest zarówno z procesem tarcia, jak i przeniesieniem materiału PEEK/BG na powierzchnię warstwy. Parametr  $Spk$  charakteryzuje zachowanie powierzchni podczas docierania. Niska wartość tego parametru świadczy o zwiększonej odporności na ścieranie w związku ze zmianą charakteru współpracy, wynikającej z szybszego etapu docierania [L. 8]. Warstwy E i H wytwarzane przy gęstości prądu anodowania  $4 \text{ A/dm}^2$  (60 minut) cechują się jedną z najniższych wartości parametru  $Spk$  zarówno przed, jak i po teście ślizgowym.

Parametr  $Svk$  określa zdolność przenoszenia tworzywa na powierzchnię tlenku oraz utrzymywania go w zagłębieniach chropowatości [L. 8]. Warstwę H cechuje wysoka wartość tego parametru, w związku z czym posiada zdolność zachowania większych ilości tworzywa PEEK/BG na powierzchni w trakcie skojarzenia ślizgowego.

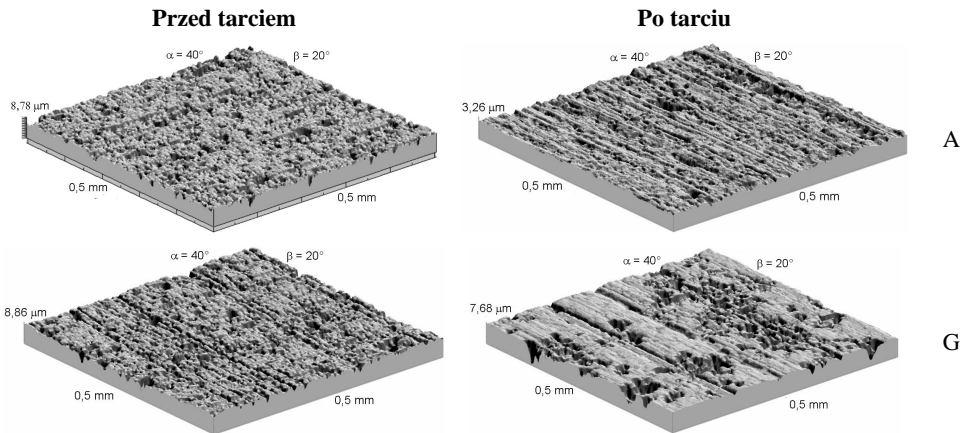
Na Rys. 5 przedstawiono obrazy izometryczne warstw tlenkowych  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WS}_2$  przed i po tarcu. Skojarzenie warstwa G–tworzywo PEEK/BG wykazuje ślizgowy charakter współpracy o niskim współczynniku tarcia wynoszącym  $\mu = 0,15$ .

**Tabela 4. Parametry krzywej Abbotta-Firestone'a przed i po współpracy tribologicznej dla badanych próbek**

Table 4. Abbotte-Firestone curve parameters before and after tribological interaction for measured counter-specimen

Próbki	$Sk$ [ $\mu\text{m}$ ]		$Spk$ [ $\mu\text{m}$ ]		$Svk$ [ $\mu\text{m}$ ]	
	przed testem	po teście	przed testem	po teście	przed testem	po teście
A	2,18	0,83	0,52	0,32	2,17	0,81
B	2,35	1,24	0,52	0,35	2,46	1,23
C	2,02	0,87	0,44	0,28	2	1,85
D	2,18	0,7	0,53	0,24	1,94	1,42
E	2,19	0,88	0,52	0,25	2,12	1,64
F	2,13	1,02	0,52	0,36	2,03	0,99
G	2,15	1,43	0,46	0,34	2,02	2,19
H	2,23	1,24	0,51	0,23	2,47	1,64

$Sk$  – wysokość chropowatości rdzenia,  $Spk$  – zredukowana wysokość wzniesień,  $Svk$  – zredukowana głębokość wgłębień



**Rys. 5. Obrazy izometryczne warstw tlenkowych  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WS}_2$  przed i po tarceniu, z największą (A) i najmniejszą (G) różnicą chropowatości**

Fig. 5. Isometric image of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WS}_2$  surface layers before and after tribological interaction, with the highest (A) and the lowest (G) difference of roughness

## PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy wyników stwierdzono, że w wyniku skojarzenia bezsmarowego warstw  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WS}_2$  z tworzywem BEEK/BG następuje przeniesienie materiału tworzywa na powierzchnię tlenku. Przeprowadzona modyfikacja warstw  $\text{Al}_2\text{O}_3$  wytwarzanych z uwzględnieniem wyższych wartości gęstości prądu (3, 4  $\text{A}/\text{dm}^2$ ), przy zachowaniu stałej gęstości ładunku elektrycznego 240  $\text{A}\cdot\text{min}/\text{dm}^2$ , skutkuje zmniejszeniem wartości



współczynnika tarcia w skojarzeniu z tworzywem PEEK/BG. Zastosowanie niższych gęstości prądu w trakcie wytwarzania warstw modyfikowanych  $WS_2$  powoduje wzrost współczynnika tarcia. Intensywność zużywania tribopartnera z tworzywa PEEK/BG jest w wysokim stopniu uzależniona od czasu docierania skojarzenia ślizgowego. Warstwy  $Al_2O_3$  modyfikowane  $WS_2$  cechują się niewielką chropowatością i ujemną skośnością, co zapewnia im dużą odporność na zużywanie w węzłach ślizgowych z tworzywem sztucznym.

## LITERATURA

1. Bewilogua K., Brauer G., Dietz A., Gabler J., Goch G., Karpuschewski B., Szyszka B., Surface technology for automotive engineering, CIPR Annals – Manufacturing Technology 58 (2009), pp. 608–627.
2. Miller W.S., Zhuang L., Bottema J., Wittebrood A.J., De Smet P., Haszler A., Vieregge A., Recent development in aluminium alloys for the automotive industry, Mater. Sci. Eng. A280 (2000), pp. 37–49.
3. Merlo A.M., The contribution of surface engineering to the product performance in the automotive industry, Surface and Coatings Technology, Volumes 174–175, 2003, pp. 21–26.
4. Posmyk A., Warstwy Powierzchniowe Aluminiowych Tworzyw Konstrukcyjnych, Wydawnictwo Politechniki Gliwickiej, Gliwice 2010.
5. Burakowski T., Marczak R., Senatorski J., Marczak M., Znaczenie transformacji warstwy wierzchniej technologicznej eksploatacyjną, Tribologia 5–6 (1997).
6. Bąk M., Zmiany struktury geometrycznej powierzchni elementów łożysk tocznych w trakcie pracy, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej 63 (2008), pp. 109–119.
7. Pytko S., Pytko P., Furmaniak K., Tribologia smarowania granicznego, Tribologia 5 (2011), pp. 189–204.
8. Oczó K., Liubimov V., Struktura geometryczna powierzchnia, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.

## Summary

**This article presents the tribological results of modified oxide layer  $Al_2O_3/WS_2$  with a plastic PEEK/BG sliding couple. The tribological properties include the results of the wear intensity of the material PEEK/BG, measurements of the friction coefficient of sliding pair and the results of surface texture parameters  $Al_2O_3/WS_2$  layers. It was shown that PEEK/BG- $Al_2O_3/WS_2$  sliding pair for coatings produced in 60 and 80 minutes (at constant electric charge density of  $240 A \cdot min/dm^2$ ) have the lower friction coefficient than unmodified coatings. Profilographometric tests demonstrated that  $Al_2O_3/WS_2$  coatings obtained at a constant electric charge density of  $240 A \cdot min/dm^2$  have favourable SGS parameters for the sliding surfaces.**

