

WZROST TRWAŁOŚCI EKSPLOATACYJNEJ SKOJARZENIA TWORZYWO POLIMEROWE - POWŁOKA TLENKOWA WYTWARZANA METODĄ ANODOWANIA IMPULSOWEGO

INCREASE OF OPERATIONAL DURABILITY OF A PLASTIC MATERIAL-OXIDE COATING COUPLE AS A RESULT OF THE APPLICATION OF A PULSED ANODIZING PROCESS

W pracy przedstawiono zagadnienie modyfikacji trwałości eksploatacyjnej bezsmarowych węzłów tarcia tworzywo PEEK/BG - powłoka tlenkowa na aluminium poprzez zastosowanie anodowania impulsowego stopu aluminium EN-AW-ALMg2. Anodowanie prowadzono stosując prostokątne przebiegi prądu o zmiennej częstotliwości (3,3÷100 Hz) oraz zmiennym wypełnieniu impulsu (60÷100%). W efekcie uzyskano znaczne obniżenie zużycia tworzywa polimerowego PEEK/BG współpracującego ślizgowo, bezsmarowo z anodowymi powłokami tlenkowymi w ruchu posuwisto-zwrotnym, w warunkach odpowiadających pracy silowników pneumatycznych. Zmniejszenie zużycia polimeru wynikało w znacznej mierze z korzystnej zmiany struktury geometrycznej powierzchni uzyskanej przez zastosowanie anodowania impulsowego.

Słowa kluczowe: Trwałość eksploatacyjna, powłoka tlenkowa, tworzywo polimerowe.

The paper presents the problem of improving the operational durability of lubricant-free friction couples consisting of the PEEK/BG material and an oxide coating deposited on aluminium, by applying pulsed anodizing of the aluminium alloy EN-AW-ALMg2. The anodizing process was conducted using a rectangular current waveform of variable frequency (3.3÷100 Hz) and a variable duty cycle of the pulse (60÷100%). As a result, a significant reduction of wear was obtained for the polymer material, PEEK/BG, involved in a sliding, lubricant-free interaction with anodic hard coatings in a reciprocating motion, under conditions corresponding to the work of pneumatic servo-motors. The decrease in polymer wear was, in large measure, a result of an advantageous change in the geometrical surface structure achieved by applying pulsed anodizing.

Keywords: tribological properties, oxide coatings, plastics.

1. Wprowadzenie

Jednym ze stosowanych rozwiązań zapewniających wzrost trwałości eksploatacyjnej w węzłach kinematycznych maszyn bezsmarowych jest zastosowanie par ślizgowych polimer – anodowa powłoka tlenkowa na aluminium. Właściwości tribologiczne anodowych powłok tlenkowych (APT) na stopach aluminium można kształtować poprzez zmianę warunków procesu anodowania twardego, takich jak: skład, pH i temperatura elektrolitu, czas procesu oraz anodowa gęstość prądu [9-11]. Zmiana ww. parametrów wytwarzania pozwala bowiem na modyfikacje morfologii i chropowatości powierzchni APT, jak również ich grubości i mikrotwardości, co istotnie wpływa na odporność zużyciową, a w konsekwencji na trwałość eksploatacyjną skojarzenia tribologicznego. Poprawę właściwości anodowych powłok tlenkowych umożliwia również zmiana kształtu prądu anodowego, szczególnie zastosowanie przebiegów prostokątnych [3, 6]. Metoda impulsowa (o prostokątnym przebiegu prądu) stosowana jest głównie podczas katodowego osadzania powłok metalicznych. Metoda impulsowa ułatwia desorpcje produktów gazowych i lepszy dostęp jonów metali do pokrywanej powierzchni. Umożliwia to uzyskanie powłok o zwiększonej jednorodności struktury, mniejszej porowatości i chropowatości powierzchni [1, 4]. Podobne efekty uzyskuje się stosując metodę impulsową podczas anodowego utleniania aluminium [4-5], co potwierdzają

1. Introduction

One of the solutions which ensure an increase of the service life of kinematic couples in lubricant-free machines is the application of sliding partners: a polymer and an anodic hard coating (AHC) on aluminium. Tribological properties of AHC on aluminium alloys can be shaped through changing the conditions of the hard anodizing process, including: the composition, pH and electrolyte temperature, process time and anodic current density [9-11]. A change of the above-mentioned process parameters enables modifying the morphology and roughness of the surface, thickness and microhardness of AHCs, which has a significant impact on their resistance to wear and, in consequence, on the operational durability of the tribological couple. An improvement of anodic oxide coatings' properties can be also achieved by a change in the anodic current shape, especially by applying rectangular waveforms [3, 6]. The pulsed method (with a rectangular waveform) is most frequently applied during cathodic deposition of metallic coatings. It facilitates desorption of gaseous products and allows better access for metal ions to the surface being coated. This enables obtaining of coatings with enhanced structure homogeneity, lower surface porosity and roughness [1, 4]. Similar effects are obtained when applying the pulsed method during anodic oxidation of aluminium [4-5], which is corroborated by the results of the authors' own studies [7]. A change in the

również wyniki badań własnych [7]. Zmiana kształtu prądu procesu elektrolitycznego utleniania aluminium wykorzystywana jest również do uzyskiwania kompozytów na osnowie APT [2, 9]. Natomiast celem prezentowanych badań jest ocena przydatności metody anodowania impulsowego stopów aluminium, do poprawy właściwości tribologicznych anodowych powłok tlenkowych, a poprzez to - poprawy trwałości eksploatacyjnej skojarzeń ślizgowych tworzywo polimerowe (PEEK/BG) – APT.

2. Materiał badawczy

Przedmiotem badań była anodowa powłoka tlenkowa wytwarzana na stopie aluminium EN-AW-AlMg2 metodą anodowania impulsowego (o prostokątnych przebiegach prądu). Anodowanie prowadzono przy użyciu stabilizowanego zasilacza impulsowego ZI-101 stosując zmienne częstotliwości (3,3÷100 Hz) oraz wypełnienie (60÷100%) przebiegów prostokątnych. Tabela 1 przedstawia spis zastosowanych modyfikacji przebiegów prądu anodowania impulsowego, natomiast rysunek 1 zawiera oznaczenia parametrów przebiegu prądu. Proces elektrolityczny prowadzono przy zachowaniu stałych gęstości ładunku elektrycznego 108 A·s/m² w czasie 60 minut i temperaturze 293K. Elektrolit stanowił wodny roztwór kwasu siarkowego, szczawiowego i ftalowego. Powłoki nanoszono na powierzchni 11,8×10⁻⁴ m² blachy aluminiowej o grubości 4×10⁻³ m.

Jako próbki w badaniach tribologicznych zastosowano niskotarciowe tworzywo PEEK/BG (polieteroeteroketon z dodatkiem grafitu, PTFE i włókien węglowych, rys. 2 w formie sześciianu o krawędzi 0,01 m.

current waveform in electrolytic oxidation of aluminium is also used to obtain AHC based composites [2, 9]. The objective of the present study is an evaluation of the usefulness of pulsed anodizing of aluminium alloys for improving the tribological properties of anodic hard coatings and, thereby, enhancing the operational durability of plastic (PEEK/BG) – AHC sliding couples.

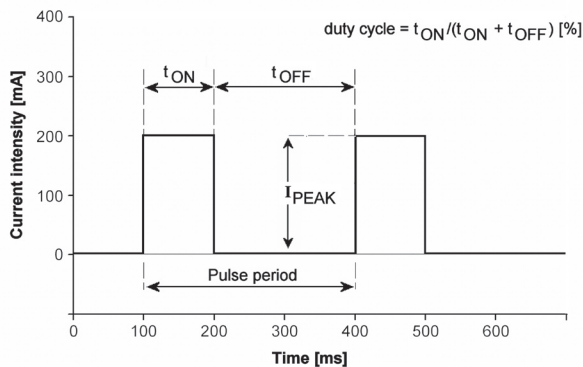
2. Research material

The object of the research was an anodic hard coating produced on the EN-AW-AlMg2 aluminium alloy via the pulsed anodizing method (with rectangular current waveforms). The anodizing process was performed using a stabilized impulse feeder, ZI-101, with applying variable frequencies (3.3÷100 Hz) and duty cycles (60÷100%) of rectangular waveforms. Table 1 presents a list of modifications introduced in impulsed anodizing current distributions and Figure 1 shows the designations of the current parameters. The electrolytic process was conducted at constant density of electric charge of 108 A·s/m² over 60 minutes and at a temperature of 293K. The electrolyte used was an aqueous solution of sulfuric, oxalic and phthalic acids. The coatings were applied onto the surface of 11.8×10⁻⁴ m² area of a 4×10⁻³ m thick aluminium plate.

The samples used in tribological tests were made of a low-friction PEEK/BG material (polyetheretherketone with a graphite addition, PTFE and carbon fibres, Fig. 2 in the form of a cube with a 0,01 m side.

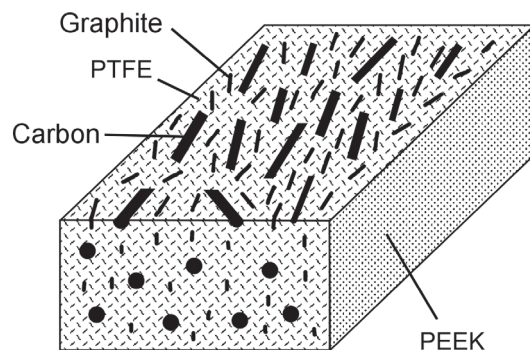
Tab. 1. Oznaczenia parametrów zastosowanego przebiegu prądu impulsowego
Tab. 1. Designations of the parameters of the pulsed current applied

AHC counter-specimen	Pulse period [ms]	t _{ON} [ms]	t _{OFF} [ms]	Duty cycle [%]	I _{PEAK} [mA]
1	Direct current	∞	0	100	354
2	100	90	10	90	393
3	100	80	20	80	443
4	100	70	30	70	506
5	100	60	40	60	590
6	10	8	2	80	443
7	50	40	10	80	443
8	100	80	20	80	443
9	300	240	60	80	443



Rys. 1. Oznaczenia parametrów zastosowanego przebiegu prądu impulsowego

Fig. 1. Designations of the parameters of the pulsed current applied



Rys. 2. Schemat budowy struktury tworzywa PEEK/BG [8]

Fig. 2. Diagram of the architecture of PEEK/BG structure [8]

3. Metodyka badań

Badania tribologiczne prowadzono w skojarzeniu ślizgowym bezsmarowym tworzywo PEEK/BG – anodowa powłoka tlenkowa na stanowisku tribologicznym RS-2007, w ruchu posuwisto zwrotnym, w warunkach odpowiadających pracy silowników bezsmarowych. Badania prowadzono na drodze 25 km stosując naciski 0,3 MPa oraz średnie prędkości poślizgu 0,3 m/s. Zasadnicze testy tribologiczne poprzedzono 10-cio kilometrowym testem mającym za zadanie dotarcie współpracujących triboelementów. Podczas testów tarciovo-zużyciowych rejestrowano siłę tarcia (z częstotliwością 50 Hz) oraz zużycie masowe próbki z tworzywa PEEK/BG. Ubytek masy mierzono za pomocą wagi analitycznej WA – 35. Ze względu na posuwisto-zwrotny charakter ruchu charakteryzujący się sinusoidalnymi zmianami wartości siły tarcia, współczynnik tarcia wyznaczano jako średnią z wartości bezwzględnej sygnałów pomiarowych, w ustalonym zakresie tarcia.

Uzupełnieniem badań tribologicznych były pomiary chropowatości powierzchni APT przed testem tribologicznym przeprowadzone przy użyciu profilografometru Form Talysur Series 2.

4. Wyniki badań

Efektom współpracy tworzywa PEEK/BG z anodowymi powłokami tlenkowymi było naniesienie polimerowego filmu ślizgowego na powierzchni wszystkich przeciwpróbek Al_2O_3 (rys. 3).



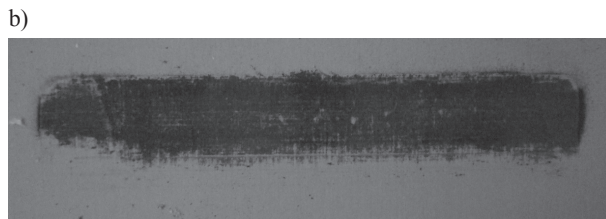
3. Research methodology

The tribological tests were conducted for a lubricant-free sliding couple: PEEK/BG – anodic hard coating, on a tribological stand, RS-2007, in a reciprocating motion, under conditions corresponding to the service conditions of lubricant-free servomotors. The tests were carried out on a 25 km distance using pressures of 0.3 MPa and average sliding speeds of 0.3 m/s. The principal tribological tests were preceded by a 10 km test aimed at wearing-in of the interacting tribocomponents. During friction-wear tests, the friction force (at a frequency of 50 Hz) and mass wear of the PEEK/BG specimen were recorded. Weight loss was measured using an analytical balance, WA – 35. Owing to a reciprocating nature of the motion, characterized by sinusoidal changes of friction force values, the friction coefficient was determined as an average of the absolute value of measuring signals in a stabilized friction range.

As a complement to the tribological tests, measurement of AHC surface roughness was made prior to the tribological test, using the Form Talysurf Series 2 profilographometer.

4. Research results

An effect of the interaction between PEEK/BG and anodic hard coatings was the deposition of a polymer sliding film on the surfaces of all Al_2O_3 counter-specimens (Fig. 3).



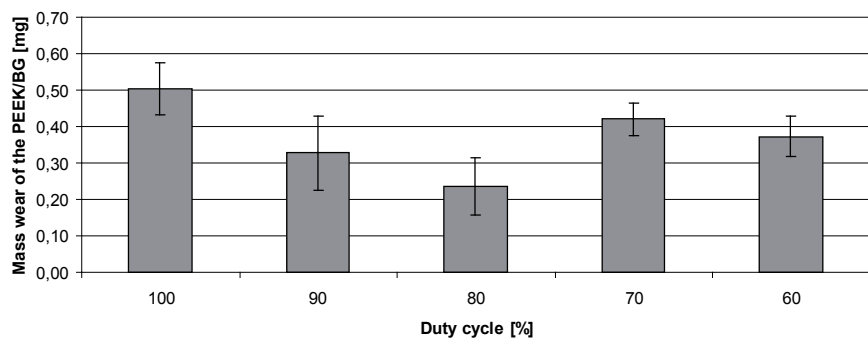
Rys. 3. Zdjęcia powierzchni powłoki tlenkowej stanowiących przeciwpróbki w badaniach tribologicznych: (a) przed testem tribologicznym, (b) po teście tribologicznym

Fig. 3. Photos of oxide coatings representing the counter-specimens in the tribological tests: (a) before tribological test, (b) after tribological test

Wyniki zużycia masowego tworzywa PEEK/BG we współpracy z anodowymi powłokami tlenkowymi wytworzonymi metodą impulsową, stosując zmienne wypełnienie pulsów (przeciwpróbki 2÷5), wykazują występowanie optymalnych warunków procesu elektrochemicznego (rys. 4). Najmniejsze zużycie tworzywa PEEK/BG zachodzi dla 80 % wypełnienia przebiegu prostokątnego prądu (przy częstotliwości 10 Hz). Natomiast w stosunku do metody stałoprądowej (przeciwpróbka 1, wy-

The results of mass wear of the PEEK/BG material interacting with anodic hard coatings produced via the pulsed method, with applying variable duty cycles (counter-specimens 2÷5), show the presence of optimal conditions for the electrochemical process (Fig. 4).

The lowest wear of the PEEK/BG material took place for an 80% duty cycle with a rectangular current waveform (at frequency of 10 Hz). In relation to the direct-current method (coun-



Rys. 4. Wyniki zużycia masowego tworzywa PEEK/BG we współpracy z anodowymi powłokami tlenkowymi wytworzonymi metodą impulsową, stosując zmienne wypełnienie przebiegu prostokątnego prądu

Fig. 4. Results of mass wear of the PEEK/BG material interacting with anodic hard coatings fabricated via the pulse method, with applying variable duty cycles of a rectangular current waveform

pełnienie 100%) uzyskano obniżenie zużycia próbki polimerowej w całym badanym zakresie zmian wypełnienia przebiegów prostokątnych anodowania impulsowego, tj. 90÷60 %. Wyniki badań chropowatości powierzchni powłok przed współpracą tribologiczną, ujawniają istotny wpływ zmian struktury geometrycznej powierzchni (uzyskanych w wyniku zastosowania anodowania impulsowego) na uzyskane wyniki zużycia masowego. Najmniejszą chropowatość powierzchni (wartość parametru Ra) i najkorzystniejszy stosunek parametrów Rp/Rv wykazują powłoki tlenkowe wytwarzane przy 80 % wypełnieniu przebiegu prostokątnego prądu impulsowego (rys. 5). Również inne parametry chropowatości powierzchni: Rz, Rsk, Rmr(c), parametry krzywej udziału nośnego (nie zamieszczone w tym opracowaniu) potwierdzają powyższe stwierdzenie.

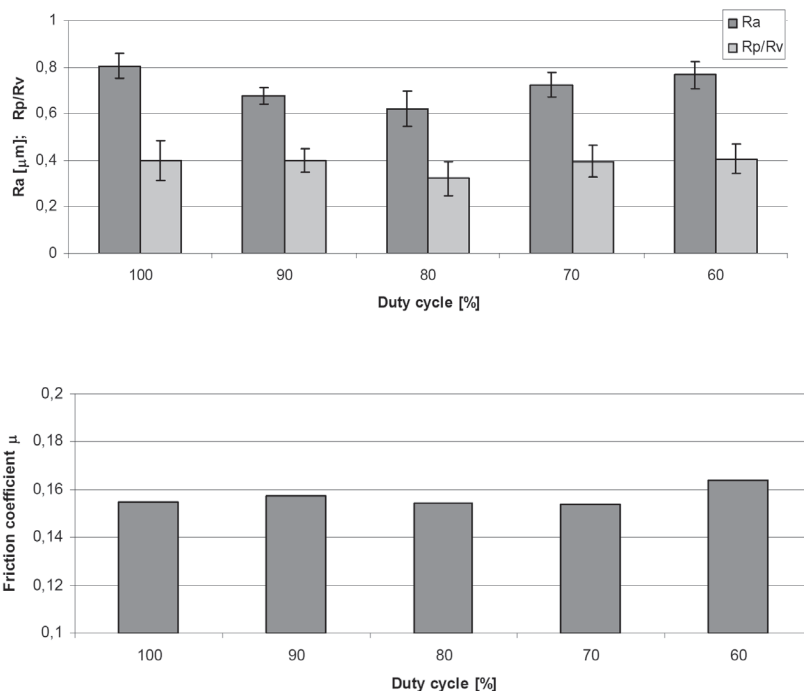
Wartości średnich współczynników tarcia PEEK/BG-APT, w przypadku powłok otrzymywanych przy zmiennych wypełnieniach pulsów prądu anodowania, nie wykazały natomiast istotnych zmian w omawianym zakresie modyfikacji prądu i przybierały po ustabilizowaniu przebiegu wartość ok. 0,14÷0,16 (rys. 6).

W przypadku współpracy tribologicznej tworzywa PEEK/BG z anodowymi powłokami tlenkowymi wytworzonymi metodą impulsową, stosując zmienne częstotliwości pulsów (przeciwpróbki 6÷9), również zanotowano zmniejszenie zużycia próbek polimerowych – co można zaobserwować na rys. 7. Optymalna częstotliwość zmian przebiegów prostokątnych prądu (przy wypełnieniu przebiegu 80 %-wym) to 10 do 20 Hz (okres 100 do 50 ms). Znaczne obniżenie zużycia tworzywa PEEK/BG i tym razem wynikało z różnic w chropowatości powierzchni powłok wytworzonych metodą impulsową oraz stałoprądową, co przedstawiono na rys. 8. Natomiast, w odróżnieniu od modyfikacji powłoki tlenkowej poprzez zmianę wypełnienia przebiegu prostokątnego prądu, w przypadku modyfikacji częstotliwości pulsów - zmniejszonemu zużyciu próbek towarzyszył niewielki wzrost współczynnika tarcia tworzywa PEEK/BG- anodowa powłoka tlenkowa (rys. 9).

ter-specimen 1, 100% duty cycle), a reduction was achieved in the wear of the polymer sample throughout the entire range of changes in the duty cycles of rectangular waveforms of pulsed anodizing, i.e. 90÷60 %. The results of examination of the coatings' surface roughness before tribological interaction show a significant influence of changes in the surface geometrical structure (achieved as a result of pulsed anodizing application) on the obtained results of mass wear. The lowest surface roughness (value of parameter Ra) and the most favourable ratio of Rp/Rv are characteristic for the oxide coatings fabricated at a 80% duty cycle with a rectangular waveform of pulse current (Fig. 5). Other surface roughness parameters, such as: Rz, Rsk, Rmr(c) and the parameters of the bearing surface curve (not included in this study), also corroborate the above statement.

The mean friction coefficient values for PEEK/BG-AHC, for coatings obtained with variable duty cycles of anodizing current pulses, have not shown any significant changes in the discussed range of current modification and after stabilization, adopted values of ca. 0.14÷0.16 (Fig. 6).

Regarding the tribological interaction of the PEEK/BG material with anodic hard coatings fabricated via a pulse method and applying variable pulse frequencies (counter-specimens 6÷9), the recorded wear of the polymer samples was lower as well, which can be seen in Fig.7. The optimal frequency of variations in rectangular current waveforms (with an 80% duty cycle) is from 10 to 20 Hz (period from 100 to 50 ms). The considerable reduction in PEEK/BG's wear in that case also resulted from the differences in surface roughness of the coatings created via pulse and direct-current methods, which is shown in Fig. 8. As opposed to an oxide coating modification by changing the duty cycle with a rectangular current waveform, in the case of a pulse frequency modification, the reduced wear of the specimens was accompanied by an insignificant increase of the friction coefficient for PEEK/BG-anodic oxide coating (Fig. 9).

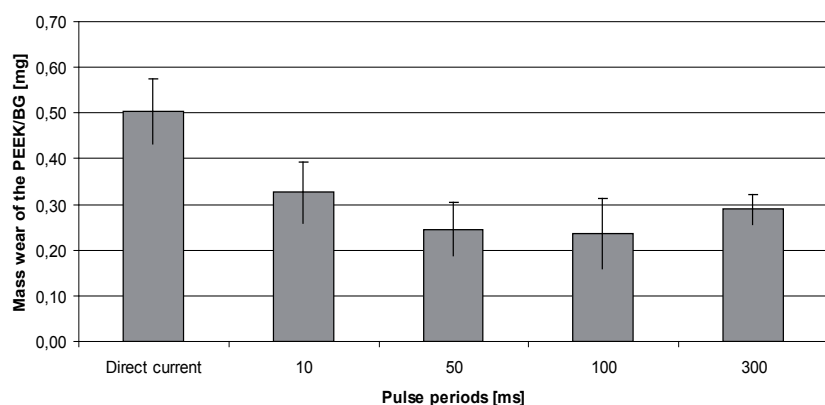


Rys. 5. Zmiana średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości Ra powierzchni oraz stosunku parametrów chropowatości powierzchni Rp/Rv powłok tlenkowych wytworzonych metodą impulsową, stosując zmienne wypełnienie przebiegu prostokątnego prądu

Fig. 5. Change in the mean arithmetic deviation of the surface roughness profile, Ra, and the surface roughness parameters' ratio, Rp/Rv, for oxide coatings fabricated via the pulse method with applying variable duty cycles of a rectangular current waveform

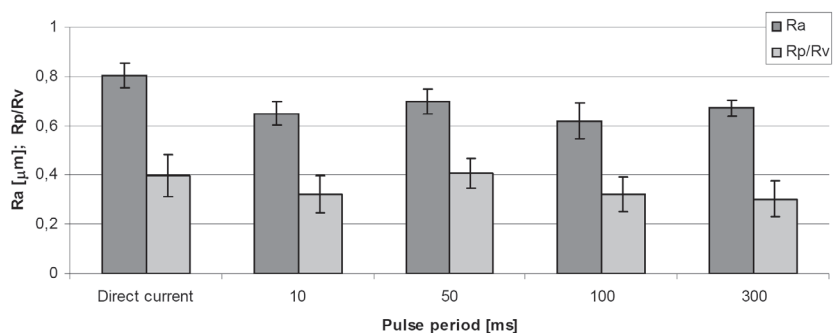
Rys. 6. Zmiana średniego współczynnika tarcia tworzywa PEEK/BG – APT, dla powłok tlenkowych wytworzonych metodą impulsową, stosując zmienne wypełnienie przebiegu prostokątnego prądu

Fig. 6. Change in the mean friction coefficient of PEEK/BG - AHC, for oxide coatings fabricated via the pulse method, with applying variable duty cycles of a rectangular current waveform



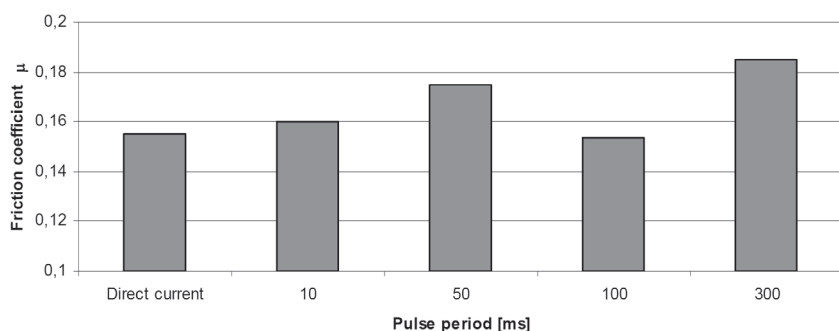
Rys. 7. Wyniki zużycia masowego tworzywa PEEK/BG we współpracy z anodowymi powłokami tlenkowymi wytworzonymi metodą impulsową, stosując zmienne okresy prądu impulsowego

Fig. 7. Results of mass wear of the PEEK/BG material interacting with anodic hard coatings fabricated via the pulse method, with applying variable pulse periods of a rectangular current waveform



Rys. 8. Zmiana średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości Ra powierzchni oraz stosunku parametrów chropowatości powierzchni Rp/Rv powłok tlenkowych wytworzonych metodą impulsową, stosując zmienne okresy prądu impulsowego

Fig. 8. Change in the mean arithmetic deviation of the surface roughness profile, Ra, and the surface roughness parameters' ratio, Rp/Rv, for oxide coatings fabricated via the pulse method with applying variable pulse periods of a rectangular current waveform



Rys. 9. Zmiana średniego współczynnika tarcia tworzywa PEEK/BG – APT, dla powłok tlenkowych wytworzonych metodą impulsową, stosując zmienne okresy prądu impulsowego

Fig. 9. Change in the mean friction coefficient of PEEK/BG AHC, for oxide coatings fabricated via the pulse method, with applying variable pulse periods of a rectangular current waveform

5. Podsumowanie

Przedstawione powyżej wyniki badań dowodzą, iż zastosowanie metody impulsowej o prostokątnym przebiegu prądu do anodowania twardego stopów aluminium, pozwala modyfikować właściwości tribologiczne anodowych powłok tlenkowych. W efekcie podczas współpracy ślizgowej tak otrzymanej powłoki tlenkowej z tworzywem sztucznym PEEK/BG (w warunkach odpowiadających pracy skojarzenia cylinder-polimerowe uszczelnienie siłowników pneumatycznych) uzyskuje się wzrost trwałości eksploatacyjnej węzła kinematycznego. Efekt ten wynika z faktu, iż metoda impulsowa umożliwia kształtowanie struktury geometrycznej powierzchni (SGP) powłok tlenkowych (także morfologii powierzchni, struktury oraz właściwości mechanicznych – np. mikrotwardość). Godne podkreślenia jest, iż uzyskiwane zmiany SGP powierzchni powłok tlenkowych wynikają tylko i wyłącznie z innego rozkładu w czasie ładunków elektrycznych. W rezultacie poprzez zmianę częstotliwości zmian oraz wypełnienia przebiegów prostokątnych prądu impul-

5. Conclusion

The research results presented above prove that application of the pulse method with a rectangular current waveform for hard anodization of aluminium alloys allows us to modify the tribological properties of anodic hard coatings. As a result, in the course of sliding contact of the so obtained oxide coating with PEEK/BG (in conditions corresponding to the service conditions of the cylinder – polymer sealing couple in pneumatic servo-motors), the operational durability of the kinematic pair is increased. This effect results from the fact that the pulse method enables shaping the geometric structure of the surface of oxide coatings (as well as the surface morphology, structure and mechanical properties, e.g. microhardness). It is worth emphasizing that the achieved changes in SGS of oxide coatings result exclusively from a different waveform of electric charges in time. As a consequence, through changing the frequency of changes and duty cycles with rectangular waveforms of pulse current, a significant reduction of wear of the polymer counter-tribopartner is achieved. In the in-

sowego uzyskuje się znaczne obniżenie zużycia polimerowego przeciwtribopartnera. W badanym zakresie optymalnymi warunkami, z punktu widzenia odporności na zużycie tworzywa PEEK/BG, jest anodowanie przy 80% wypełnieniu przebiegu oraz z częstotliwością jego zmian od 10 do 20 Hz.

vestigated range and from the point of view of PEEK/BG's resistance to wear, anodizing with an 80% duty cycle and frequency of its changes of 10 to 20 Hz, represents optimal conditions.

6. References

1. Ashassi-Sorkhabia H., Hagraha A., Parvini-Ahmadib N., Manzoori J. Zinc-nickel alloy coatings electrodeposited from a chloride bath using direct and pulse current. *Surface and Coatings Technology* 2001; 3: 278-283.
2. Arurault L., Salmi J., Bes R. S. Comparison of AC voltage and periodic-reverse current nickel pigmented anodized aluminium as solar selective absorber. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2004; 3: 447-455.
3. Brace A. W. *Hard Anodizing of Aluminium*. Stonehouse: Technicopy Limited, 1987.
4. Colombini C. The use of pulse rectifiers in anodizing and plating. *Metal Finishing* 1992; 5: 42-46.
5. Fratila-Apachitei L.E., Duszczuk J., Katgerman L. AlSi(Cu) anodic oxide layers formed in H₂SO₄ at low temperature using different current waveforms. *Surface and Coatings Technology* 2003; 3: 232-240.
6. Hsing-Hsiang Shih, Shiang-Lin Tzou: Study of anodic oxidation of aluminum in mixed acid using a pulsed current. *Surface and Coatings Technology* 2000; 2-3: 278-285.
7. Kmita T., Skoneczny W. Warstwy tlenkowe na stopach aluminium otrzymane metodą anodowania impulsowego. *Inżynieria Materiałowa* 2006; 5: 1061-1064.
8. Lu Z. P., Friedrich K. On sliding friction and wear of PEEK and Its composites. *Wear* 1995; 181-183: 624-631.
9. Posmyk A. Kształtowanie własności tribologicznych warstw wierzchnich tworzyw na bazie aluminium. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Hutnictwo*, z. 62. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2002.
10. Skoneczny W., Kmita T. Analiza parametrów tarcia tworzywa PEEK/BG współpracującego z warstwą tlenkową. *Materiały polimerowe i ich przetwórstwo*. Praca zbior. pod red. J. Koszkula. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2004.
11. Wołek M. *Elementy ślizgowe par czterofluoroetylen i stopów aluminium o specjalnie przygotowanej warstwie zewnętrznej*. Katowice: Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, 1983.

Dr Tomasz KMITA

Prof. dr hab. Władysław SKONECZNY

Uniwersytet Śląski

Katedra Materiałoznawstwa

41-200 Sosnowiec, ul. Śnieżna 2

e-mail: Tomasz.Kmita@us.edu.pl; Wladyslaw.Skoneczny@us.edu.pl
