



Badania tarciovo-zużyciowe skojarzeń materiałowych typu metal-polimer znajdujących zastosowanie w implantach ortopedycznych

Friction and wear tests of metal-on-polymer articulations applicable to orthopedic implants

(1) Agnieszka Wielowiejska-Giertuga*, (2) Marta Miler, (3) Joanna Sulej-Chojnacka
Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 24.07.2015
Data recenzji: 15.02.2016
Data akceptacji: 22.03.2016

Wkład autorów

- (1) Autor koncepcji, założeń, metod
- (2) Przeprowadzenie badań tribologicznych, analiza wyników
- (3) Autor metod, analiza wyników

Streszczenie

Rosnące wśród pacjentów zapotrzebowanie na endoprotezy stawów, związane m.in. ze starzeniem się populacji, wymaga od współczesnej medycyny ciągłego postępu i udoskonalania stosowanych w implantologii materiałów. W pracy przedstawiono wyniki wstępnych badań tarciovo-zużyciowych materiałów wybranych spośród powszechnie stosowanych w endoprotezoplastyce stawu kolanowego. Badania przeprowadzono z zastosowaniem testera T-17 pracującego w skojarzeniu badawczym typu trzpień-platek (*block-on-disk*), przeznaczonego do wyznaczania charakterystyk tribologicznych skojarzeń materiałowych współpracujących ślizgowo w ruchu posuwisto-zwrotnym, ze szczególnym uwzględnieniem materiałów przeznaczonych na elementy protez stawów człowieka, np. polimerów. Wyznaczeniu charakterystyk tribologicznych oraz określeniu zużycia liniowego poddano trzpień wykonane z polietylenu o ultrawysokiej masie cząsteczkowej (UHMWPE) oraz polietylenu UHMWPE modyfikowanego witaminą E. Materiał przeciwpróbki (platek) stanowił stop CoCrMo. Badania prowadzono przez milion cykli w środowisku surowicy bydłowej o temperaturze $37^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$. Częstotliwość ruchu wynosiła $1\text{ Hz}\pm 0,1\text{ Hz}$. W celu określenia mechanizmu zużycia, powierzchnie trące badanych materiałów po testach poddano obserwacjom przy pomocy skaningowej mikroskopii elektronowej. Analiza uzyskanych wyników badań tribologicznych pozwoliła wskazać spośród badanych próbek korzystniejsze skojarzenie materiałowe, którym była para trąca: modyfikowany witaminą E polietylen UHMWPE-stop CoCrMo. Dla powyższej pary trącej odnotowano nieznacznie większe wartości współczynnika tarcia, ale jednocześnie mniejsze zużycie liniowe. Natomiast na podstawie obserwacji morfologii powierzchni określono główny mechanizm zużycia, którym było zużycie ścierno-adhezyjne.

Słowa kluczowe: tribologia, badania tarciovo-zużyciowe, UHMWPE, CoCrMo, witamina E

Article info

Received: 24.07.2015
Reviewed: 15.02.2016
Accepted: 22.03.2016

Authors' contribution

- (1) Author of the concept, assumptions and methods
- (2) Tribological tests, analysis of the results
- (3) Author of the methods, analysis of the results

Abstract

The growing demand among patients for endoprosthesis joints associated, among others, with an aging population, requires from modern medicine continuous progress and improvement of materials used in implantology. The paper presents the preliminary results of friction-wear tests of materials chosen from among those commonly used in knee endoprostheses. The tests were conducted using a T-17 tester working in a block-on-disk tribosystem designated to determine the tribological characteristics of material combinations articulating in a reciprocating motion with particular reference to the materials used for elements of human joint prostheses, e.g. polymers. The tribological characteristics were determined and the linear wear was identified for pins made of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) and UHMWPE modified with vitamin E.

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: agnieszka.wielowiejska-giertuga@inop.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: agnieszka.wielowiejska-giertuga@inop.poznan.pl

The counter specimen materials (discs) consisted of a CoCrMo alloy. The study was conducted throughout a million cycles in an environment of bovine serum at a temperature of $37^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$. The frequency of movement was $1\text{ Hz}\pm 0.1\text{ Hz}$. In order to determine the wear mechanism, the friction surfaces of the tested materials were subjected to observation using scanning electron microscopy after testing. Analysis of the tribological test results enabled the authors to indicate from among the tested samples the most advantageous material combination, which was the vitamin E modified UHMWPE-CoCrMo alloy friction pair. For the above friction pair a slightly higher friction coefficient was recorded, but also at the same time reduced linear wear. In contrast, based on the surface morphology observations, the main wear mechanism was defined which was abrasive-adhesive wear.

Keywords: tribology, friction-wear tests, UHMWPE, CoCrMo, vitamin E

1. WPROWADZENIE

Staw kolanowy, będący naturalnym biołożyskiem, stanowi jeden z najbardziej skomplikowanych, wrażliwych i narażonych na uszkodzenia układów mechanicznych w organizmie człowieka. Jest stawem złożonym, dwuosiowym, zawiasowo-obrotowym [1–3]. Ze względu na przenoszone obciążenia staw kolanowy narażony jest na częste urazy i kontuzje wymagające długotrwałego leczenia i rehabilitacji, realizowanych w zależności od przyczyny na wiele różnych sposobów w tym poprzez endoprotezoplastykę, która skutecznie uwalnia pacjenta od dolegliwości bólowych, a także przywraca ruchliwość stawu.

Obecnie stosowane endoprotezy nie tylko różnią się od siebie budową, ale także stosowanymi materiałami. Wśród materiałów metalowych najczęściej stosowane w skojarzeniu z tworzywami sztucznymi są stopy na osnowie kobaltu. Najczęściej wykorzystywanym tworzywem sztucznym jest polietylen o ultra wysokiej masie cząsteczkowej (UHMWPE – *Ultra High Molecular Weight Polyethylene*) [4–6].

Stabilizacja właściwości polietylenu była przedmiotem wielu badań, dzięki którym dowiedziono pozytywny wpływ antyoksydantów, szczególnie witaminy E, na strukturę polimerów stosowanych w medycynie. Dodatek witaminy E wpływa na usunięcie z polimeru wszelkich pozostałości wolnych rodników po napromieniowaniu, które w negatywny sposób mogłyby oddziaływać na ludzki organizm [7–9]. Jak wykazano w pracy [10], dodatek witaminy E w polietylenie UHMWPE wpływa na zwiększenie odporności na utlenienie, a całkowita ilość wolnych

1. INTRODUCTION

A knee joint being a natural bio bearing, is one of the most complex mechanical systems in the human body, sensitive and vulnerable to damage. It is a complex, two-axis, swivel-hinged joint [1–3]. Due to the load carried, the knee joint is exposed to frequent injuries and contusions requiring long-term treatment and rehabilitation carried out, depending on the cause, in many different ways including arthroplasty which effectively frees the patient from pain and restores mobility of the joint.

*The currently applied endoprostheses differ from each other not only in their construction, but also regarding the materials used. Among metal materials, the most often used in combination with plastics are cobalt based alloys. The most frequently employed plastic material is polyethylene of ultra high molecular weight (UHMWPE – *Ultra High Molecular Weight Polyethylene*) [4–6].*

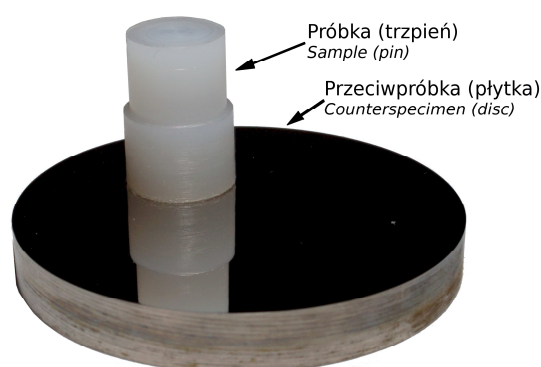
Stabilization of polyethylene properties has been the subject of several studies, thanks to which the positive impact of antioxidants, particularly vitamin E, on the structure of the polymers used in medicine has been demonstrated. The addition of vitamin E has an influence on the removal of any residual free radicals from the polymer following irradiation, which could adversely affect the human body [7–9]. As shown in [10], the addition of vitamin E to UHMWPE increases oxidation resistance, and the total amount of free radicals is stabilized at a lower level than in

rodników stabilizuje się na niższym poziomie niż w przypadku niedomieszkowanego UHMWPE. Zawartość witaminy E nie wpływa także na krystaliczność polietylenu.

Poznanie właściwości tribologicznych skojarzeń materiałowych stosowanych obecnie na endoprotezy stawu kolanowego, zwłaszcza wpływu antyoksydantów, nie jest wystarczające [11]. Celem niniejszej pracy było porównanie właściwości tribologicznych par trących UHMWPE–CoCrMo oraz modyfikowany witaminą E UHMWPE–CoCrMo, a także wytypowanie korzystniejszego skojarzenia materiałowego.

2. PRZEDMIOT I METODYKA BADAŃ

Poddane badaniom pary trące (rys. 1) stanowiły polimerowe trzpienie o średnicy 9 mm wytworzone z polietylenu o ultrawysokiej masie cząsteczkowej (UHMWPE) oraz UHMWPE modyfikowany witaminą E, materiał przeciwpróbki (płytki) stanowił stop CoCrMo. Powierzchnie trące trzpieni oraz płytek spełniały wytyczne dotyczące chropowatości normy ASTM F732 [11]. Polimerowe próbki wstępnie moczo w medium smarującym, które – zgodnie z normą ISO 14242 [12] – stanowiła surowica bydlęca rozcieńczona wodą dejonizowaną do stężenia białka wynoszącego 25 g/l z dodatkiem azydki sodu oraz EDTA w celu zahamowania wzrostu bakterii oraz związania jonów wapnia.



Rys. 1. Para trąca

Fig. 1. Friction pair

Testy tarciovo-zużyciowe przeprowadzono za pomocą testera T-17 typu trzcienie–płytki (rys. 2) przeznaczonego do badania materiałów na endo-

the case of undoped UHMWPE. However, the amount of vitamin E does not affect the crystallinity of polyethylene.

The knowledge of the tribological properties of the material combinations currently used for knee joint endoprotheses, especially the impact of antioxidants, is insufficient [11]. The aim of this study is to compare the tribological properties of UHMWPE–CoCrMo and vitamin E modified UHMWPE–CoCrMo friction pairs, as well as to select favorable materials combinations.

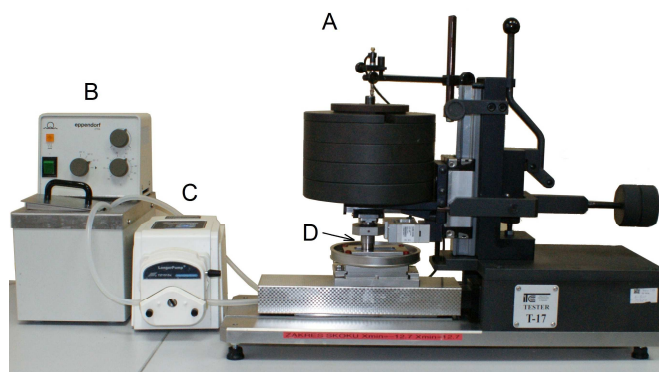
2. RESEARCH SUBJECT AND METHODS

The tested friction pairs (Fig. 1) were polymer rods with a diameter of 9 mm made of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) and UHMWPE modified with vitamin E, the counter specimen material (discs) was CoCrMo alloy. The friction surfaces of the pins and discs meet the guidelines for roughness – ASTM F732 [11]. The polymer samples were pre-soaked in a lubricating fluid which, in accordance with ISO 14242 [12], was bovine serum diluted with deionized water to a protein concentration of 25 g/l with an addition of sodium azide, and EDTA to inhibit the growth of bacteria, and binding of calcium ions.

Friction-wear tests were performed using a T-17 pin-disc tester (Fig. 2), designated to test materials for endoprotheses. The device is used

protezy. Urządzenie wykorzystywane jest do wyznaczania charakterystyk tribologicznych skojarzeń materiałowych współpracujących ślizgowo w ruchu posuwisto-zwrotnym. Aby umożliwić prowadzenie badań zgodnie ze standardem ASTM F732 [11], tester doposażono w pompkę perystaltyczną oraz układ grzewczy. Dzięki modyfikacji stanowisko badawcze pozwala na przeprowadzenie badań z zastosowaniem różnych mediów smarnych imitujących warunki występujące w naturalnym stawie, jak np. surowicy bydlęcej podgrzanej do temperatury ciała człowieka. Surowica bydlęca po przefiltrowaniu oraz podgrzaniu do zadanej temperatury podawana jest do strefy styku poprzez układ obiegowy wyposażony w pompkę perystaltyczną oraz filtr membranowy o rozmiarze porów 20 μm .

to determine the tribological characteristics of material combinations articulating in reciprocating motion. In order to enable conducting research according to standard ASTM F732 [11], the tester was equipped with a peristaltic pump and heating system. Thanks to modification of the test stand, it was possible to carry out testing using a variety of lubricant media that imitate the conditions occurring in a natural joint, such as bovine serum heated to the temperature of the human body. Bovine serum after filtering and heating to the desired temperature is fed into the contact zone through a circulating system equipped with a peristaltic pump and a membrane filter with a pore size of 20 microns.



Rys. 2. Stanowisko badawcze: a) tester tarciovo-zużyciowy T-17, b) układ grzewczy, c) pompka perystaltyczna, d) gniazdo mocowania próbki i przeciwpróbki

Fig. 2. Test stand: a) T-17 friction-wear tester, b) heating system, c) peristaltic pump, d) sample mounting socket and counter specimen

Badania przeprowadzono zgodnie ze standardem ASTM F732 [11]: zastosowano amplitudę wynoszącą 12,5 mm i docisk 200 N, częstotliwość ruchu wynosiła $1 \text{ Hz} \pm 0,1 \text{ Hz}$, test prowadzono w medium smarującym o temperaturze $37^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. Liczba cykli wynosiła 1 mln. W czasie testów rejestrowano: siłę tarcia, liczbę cykli, zużycie liniowe węzła tarcia oraz temperaturę medium smarującego. Zużycie liniowe badanego węzła tarcia zmierzono przy użyciu indukcyjnego przetwornika przemieszczenia o zakresie pomiarowym $\pm 1000 \mu\text{m}$ i klasie dokładności 0,2.

Wyznaczono charakterystyki tarciove dla poszczególnych skojarzeń (współczynnik tarcia w funkcji liczby cykli), a także charakterystyki

The studies were conducted in compliance with standard ASTM F732 [11], an amplitude of 12.5 mm and pressure of 200 N were used, the frequency of motion was $1 \text{ Hz} \pm 0.1 \text{ Hz}$. The test was carried out with the lubricating medium at a temperature of $37^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ and the number of cycles was 1 million. During testing the following were recorded: frictional force, number of cycles, linear wear of the friction couple and the temperature of the lubricant. The linear wear of the tested friction couple was measured using an inductive displacement transducer with a measuring range of ± 1000 microns and accuracy class of 0.2.

The friction characteristics were determined for each combination (friction coefficient in function of number of cycles), as well as wear charac-

zużyciowe (sumaryczne zużycie liniowe w funkcji liczby cykli). Przedstawione w artykule wyniki stanowią średnią z trzech testów dla poszczególnych par trących. Wyznaczono regresję liniową oraz przeprowadzono statystykę t-Studenta i określono osiągnięty wskaźnik istotności. W analizie statystycznej przyjęto poziom istotności $p(\alpha) < 0,05$. Do analiz statystycznych użyto oprogramowania OriginLab. Obserwacje morfologii powierzchni trących przeprowadzono przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego Inspekt S firmy FEI.

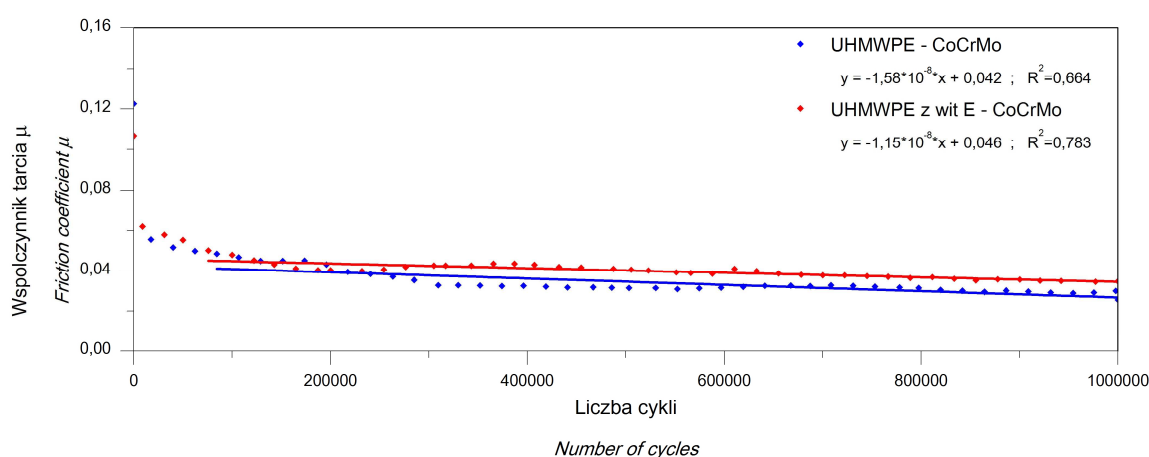
3. WYNIKI BADAŃ

Średnie wartości współczynnika tarcia dla badanych par trących przedstawiono na rys. 3. Po pierwszych 100 tysiącach cykli, dla obu par trących, nastąpiło zmniejszenie wartości współczynnika tarcia spowodowane wzajemnym dotarciem się współpracujących powierzchni. Następnie wartość współczynnika tarcia ustabilizowała się i dla obu analizowanych par trących utrzymywała się na poziomie mieszczącym się w przedziale 0,03–0,04. Współczynnik tarcia dla pary trącej UHMWPE domieszkowanego witaminą E i stopu CoCrMo wykazywał nieznacznie większą wartość w przebiegu całego testu.

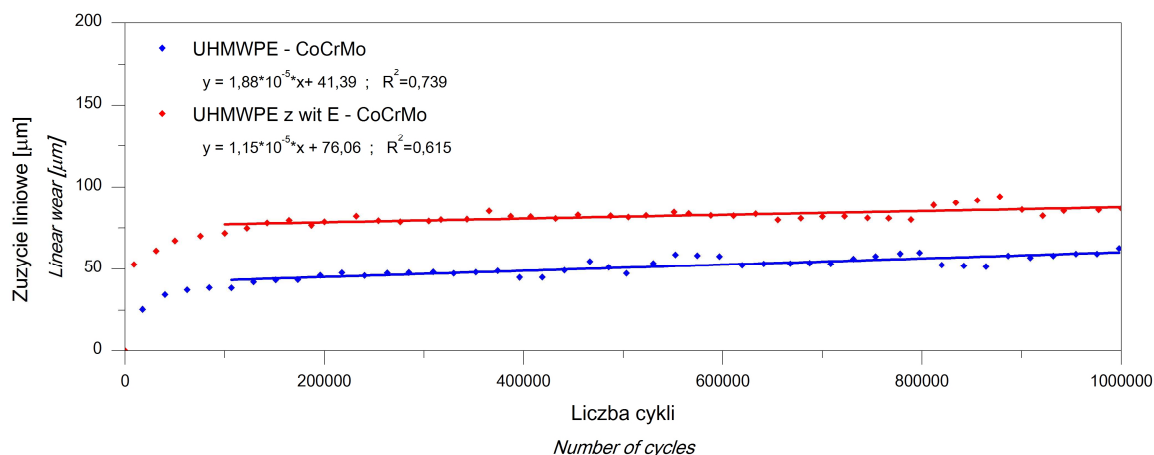
teristics (aggregated linear wear in function of number of cycles). The results presented in the article are the average of three tests for each friction pair. The linear regression was determined, Student's t-test was performed and the attained significance indicator was set. In the statistical analysis the level of significance $p(\alpha) < 0.05$ was assumed. OriginLab software was used for statistical analysis. Morphology observations of the friction surfaces were carried out using a scanning electron microscope, Inspekt S from FEI.

3. RESEARCH RESULTS

The average values of the coefficient of friction for the tested friction pairs are shown in Fig. 3. After the first one hundred thousand cycles, for both friction pairs, there is a reduction in the friction coefficient due to mutual run-in of the contact surfaces. Then the coefficient of friction stabilized, and for both of the analyzed friction pairs it remained in the range 0.03–0.04. The friction coefficient for the UHMWPE doped with vitamin E and CoCrMo alloy friction pair showed a slightly larger value during the course of the whole test.



Rys. 3. Przebieg zmian współczynnika tarcia w funkcji liczby cykli dla badanych par trących
Fig. 3. Course of changes in friction coefficient in function of number of cycles for investigated friction pairs



Rys. 4. Sumaryczne zużycie liniowe w funkcji liczby cykli dla badanych par trących

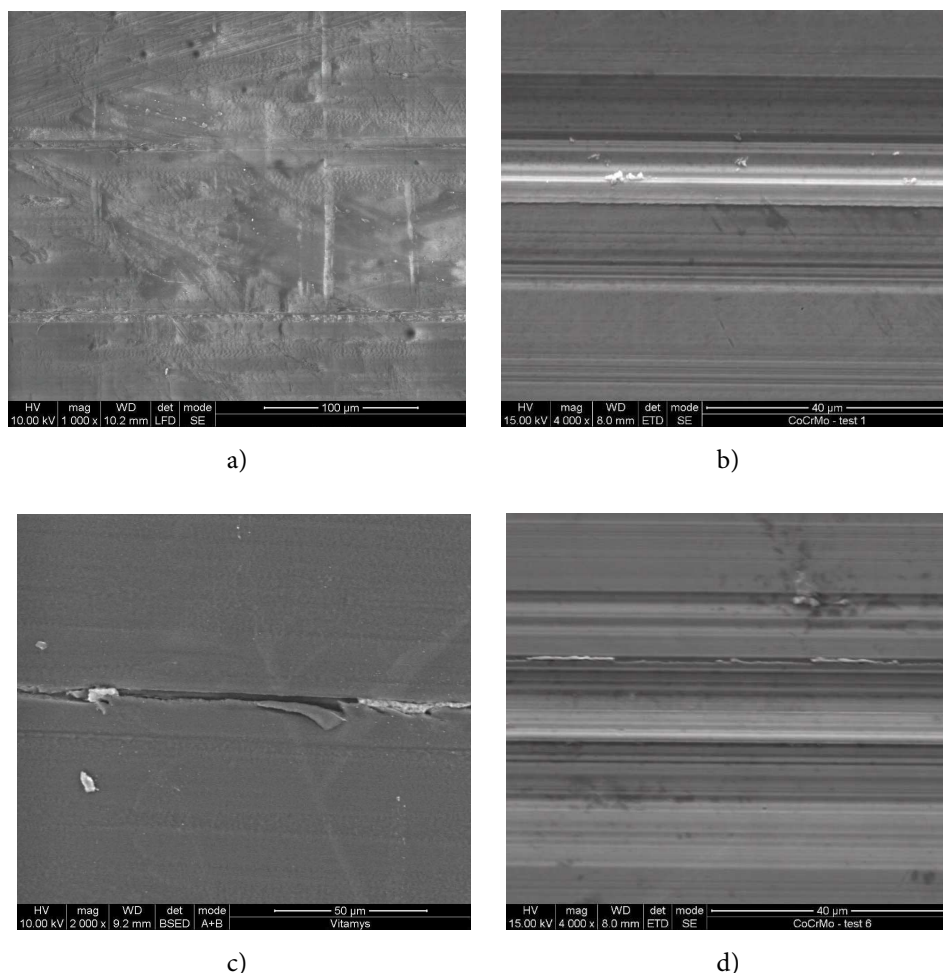
Fig. 4. Aggregate linear wear in function of number of cycles for investigated friction pairs

Na rys. 4 przedstawiono zależność średniego zużycia liniowego wyznaczonego na podstawie przeprowadzonych testów tarciovo-zużyciowych w funkcji liczby cykli. Intensywność zużywania się materiału charakteryzowana jest poprzez nachylenie linii trendu wyznaczonej dla badanych skojarzeń do osi odciętych. Im nachylenie jest mniejsze, tym mniejsza jest intensywność zużywania się materiałów. Dla badanych skojarzeń intensywność zużywania pary UHMWPE-CoCrMo była większa ($a=1,88$) niż dla pary trącej modyfikowany witaminą E UHMWPE-CoCrMo ($a=1,15$). Przy określaniu średniej intensywności zużywania pominięto początkową fazę testów, gdzie następowało docieranie badanych materiałów. Różnice w położeniu linii trendów wynikają z różnic w zużywanym polimerowym trzpieniu na etapie docierania i nie jest to istotne podczas charakteryzowania intensywności zużywania badanych skojarzeń. Przedstawione średnie nie różnią się istotnie statystycznie na przyjętym poziomie istotności $p(\alpha)<0,05$.

Otrzymane wyniki badań tribologicznych pozwoliły stwierdzić, że wartości współczynników tarcia dla obu materiałów były porównywalne, podczas gdy intensywność zużywania dla UHMWPE była większa niż dla UHMWPE modyfikowanego witaminą E. Rezultaty obserwacji powierzchni trących po zakończeniu testów tribologicznych przedstawiono na rys. 5.

Fig. 4 shows the dependence of the mean linear wear determined on the basis of the conducted friction-wear tests in function of the number of cycles. The wear intensity of the material is characterized by the slope of the trend line designated for the investigated combinations to the axis. The smaller the slope, the lower the wear intensity of the materials. For the tested combinations the wear intensity of the UHMWPE-CoCrMo pair was higher ($a=1.88$) than for the vitamin E modified UHMWPE-CoCrMo friction pair ($a=1.15$). In determining the average wear intensity, the initial phase of testing was omitted where run-in of the tested materials occurred. The differences in the position of the trend lines result from the differences in the wear of the polymeric pin at the running-in stage and are not important when characterizing the wear intensity of the tested combinations as the presented averages do not differ statistically on the assumed level of significance $p(\alpha)<0.05$.

The obtained results of tribological investigations revealed that the friction coefficient values for both materials were comparable, while the wear intensity for UHMWPE was higher than for the UHMWPE modified with vitamin E. The results of the surface friction observations after the tribological tests are shown in Fig. 5.



Rys. 5. Morfologia powierzchni trących po zakończeniu testów tribologicznych dla skojarzeń: a) trzpień-UHMWPE i b) przeciwpróbka-CoCrMo; c) trzpień-mod. UHMWPE i d) przeciwpróbka-CoCrMo; SEM

Fig. 5. Morphology of friction surfaces after tribological tests for combinations: a) pin-UHMWPE and b) counter specimen-CoCrMo; c) pin-mod. UHMWPE and d) counter specimen-CoCrMo; SEM

Na podstawie przeprowadzonych obserwacji morfologii powierzchni stwierdzono, że głównym mechanizmem zużycia było zużycie ścierno-adhezyjne, dla którego charakterystyczny jest ubytek materiału spowodowany rysowaniem, brzdowaniem oraz mikroskrawaniem. Dla obu par trących na przeciwpróbkach (rys. 5b i 5d) stwierdzono występowanie narostów („nalepień”) cząstek polietylenu pochodzących z badanych próbek (rys. 5a, 5c).

Ponieważ na właściwości mechaniczne i fizyczne polietylenu duży wpływ mają jego mikrostruktura oraz stopień krystaliczności, oczekuje się, że odporność na zużycie może być zwiększona poprzez zmianę mikrostruktury [13]. Proces usieciowania polietylenu prowadzi do powstawania wolnych rodników w fazie krystalicz-

Based on the conducted surface morphology observations, it was found that the main wear mechanism was abrasive-adhesive wear, which is characteristic for material loss caused by scratching, fissuring and microcutting. For both friction pairs (Fig. 5b and 5d), the occurrence of polyethylene particle accumulations from the tested samples was found on the counter specimens (Fig. 5a, 5c).

Since the mechanical and physical properties of polyethylene are strongly influenced by its microstructure as well as the degree of crystallinity, it is expected that the wear resistance can be increased by changing the microstructure [13]. The polyethylene crosslinking process leads to the formation of free radicals in the crystalline phase

nej, czyniąc materiał podatnym na utlenianie, a w konsekwencji pogarszając jego właściwości tribologiczne [14]. Przedstawione w niniejszej pracy wyniki badań potwierdzają, że modyfikacja struktury UHMWPE antyoksydantem (witaminą E) wpływa korzystnie na odporność na zużycie tribologiczne w porównaniu do niemodyfikowanego UHMWPE. Ustalenie optymalnego stężenia antyoksydantu w polietylenie wymaga przeprowadzenia dalszych badań.

4. WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że lepszymi właściwościami tribologicznymi charakteryzowała się para trąca mod. UHMWPE-CoCrMo. Współczynnik tarcia dla obu par trących był porównywalny, jednak intensywność zużycia dla UHMWPE-CoCrMo była większa niż dla modyfikowanego UHMWPE-CoCrMo. Uzyskana różnica w wartościach współczynnika tarcia ze względu na tak małą wartość może zostać pominięta, gdyż dla pacjenta w przebiegu leczenia nie ma ona większego znaczenia. Bardziej istotny problem stanowią produkty zużycia powstające podczas wzajemnej współpracy danego skojarzenia materiałowego. Produkty zużycia, powstające w wyniku zużycia ściernego wkładki z tworzywa sztucznego, mogą prowadzić do powstawania osteolizy tkanki kostnej w wyniku gromadzenia wokół endoprotezy cząstek polietylenu, które nie zostały usunięte z organizmu przez układ limfatyczny. Niszczenie kości, czyli osteoliza, prowadzi w konsekwencji do obluźniania endoprotezy i konieczności przeprowadzenia kolejnego zabiegu endoprotezoplastyki [15].

Obserwacje mikrostruktury pozwoliły stwierdzić, że głównym mechanizmem zużycia, jaki występuje na styku par trących, jest zużycie ścierno-adhezyjne.

PODZIĘKOWANIA

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy statutowej Instytutu Obróbki Plastycznej w Poz-

by making the material susceptible to oxidation, and consequently, impairing the tribological properties [14]. The results presented in this paper confirm that modification of the UHMWPE structure with an antioxidant (vitamin E) has a beneficial effect on the tribological wear resistance compared to unmodified UHMWPE. Determining the optimum concentration of antioxidant in polyethylene requires further investigation.

4. CONCLUSIONS

Based on the obtained results, it was found that the mod. UHMWPE-CoCrMo friction pair possessed better tribological properties. The friction coefficient of both friction pairs was comparable, but the wear rate of UHMWPE-CoCrMo was greater than that of modified UHMWPE-CoCrMo. The resulting difference in the friction coefficient values can be omitted due to such a small value because for a patient during treatment, it does not matter. A more significant problem is the wear particles generated during the mutual cooperation of the given combination of materials. The wear products arising from abrasive wear of the plastic insert may lead to the formation of bone tissue osteolysis as a result of polyethylene particles gathering around the endoprosthesis, which are not removed from the body through the lymphatic system. Bone destruction, or osteolysis consequently leads to endoprosthesis loosening and the need for further arthroplastic surgery [15].

Observations of the microstructure revealed that the main wear mechanism that occurs at the friction pair interfaces is abrasive-adhesive wear.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was carried out within the framework of the statutory work of the Metal Forming

naniu BS 901 37 pt. „Wpływ starzenia polietylenu o ultra wysokiej masie cząsteczkowej (UHMWPE) na zużycie tribologiczne w endoprotezach stawu kolanowego”.

Institute in Poznan BS 901 37 entitled “Impact of aging polyethylene of ultra high molecular weight (UHMWPE) on tribological wear in knee endoprostheses.”

LITERATURA

- [1] Gray H., Lewis W.H. 2000. *Anatomy of the human body*. New York: Bartleby.com.
- [2] Narkiewicz O., Dziewiątkowski J., Moryś J., Scisłowska S. 2015. *Anatomia człowieka: Podręcznik dla studentów*. Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL.
- [3] Reicher M., Bilikiewicz T., Hiller S., Stołyhwo E., Sieńkowski E., Łasiński W. 2010. *Anatomia ogólna: Kości, stawy i więzadła, mięśnie*. Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL.
- [4] Kurtz S.M. 2016. The Clinical Performance of UHMWPE in Knee Replacements. W *UHMWPE Biomaterials Handbook. Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices*, 123–144. Elsevier.
- [5] Spiegelberg S., Kozak A., Braithwaite G. 2016. Characterization of Physical, Chemical, and Mechanical Properties of UHMWPE. W *UHMWPE Biomaterials Handbook. Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices*, 531–552. Elsevier.
- [6] Świczko-Żurek B., Zieliński A.S., Ossowska A., Sobieszczyk S. 2014. *Biomateriały*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- [7] Oral E., Muratoglu O.K. 2016. Highly Cross-Linked UHMWPE Doped with Vitamin E. W *Biomaterials Handbook. Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices*, 307–325. Elsevier.
- [8] Renò F., Cannas M. 2006. „UHMWPE and vitamin E bioactivity: An emerging perspective”. *Biomaterials* 27 (16): 3039–3043.
- [9] Halma J.J., Eshius R., Vogely C., van Gaalen S., de Gast A. 2015. „An Un cemented Iso-Elastic Monoblock Acetabular Component Preliminary Results”. *The Journal of Arthroplasty* 30 (4): 615–621.
- [10] Lerf R., Zurbrugg D., Delfosse D. 2010. „Use of vitamin E to protect cross-linked UHMWPE from oxidation”. *Biomaterials* 31 (13): 3643–3648.
- [11] ASTM F732-00(2011), Standard Test Method for Wear Testing of Polymeric Materials Used in Total Joint Prostheses, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org.
- [12] ISO 14242: Implants for surgery -- Wear of total hip-joint prostheses -- Part 1: Loading and displacement parameters for wear-testing machines and corresponding environmental conditions for test.

REFERENCES

- [1] Gray H., Lewis W.H. 2000. *Anatomy of the human body*. New York: Bartleby.com.
- [2] Narkiewicz O., Dziewiątkowski J., Moryś J., Scisłowska S. 2015. *Anatomia człowieka: Podręcznik dla studentów*. Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL.
- [3] Reicher M., Bilikiewicz T., Hiller S., Stołyhwo E., Sieńkowski E., Łasiński W. 2010. *Anatomia ogólna: Kości, stawy i więzadła, mięśnie*. Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL.
- [4] Kurtz S.M. 2016. The Clinical Performance of UHMWPE in Knee Replacements. In *UHMWPE Biomaterials Handbook. Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices*, 123–144. Elsevier.
- [5] Spiegelberg S., Kozak A., Braithwaite G. 2016. Characterization of Physical, Chemical, and Mechanical Properties of UHMWPE. In *UHMWPE Biomaterials Handbook. Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices*, 531–552. Elsevier.
- [6] Świczko-Żurek B., Zieliński A.S., Ossowska A., Sobieszczyk S. 2014. *Biomateriały*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- [7] Oral E., Muratoglu O.K. 2016. Highly Cross-Linked UHMWPE Doped with Vitamin E. In *Biomaterials Handbook. Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices*, 307–325. Elsevier.
- [8] Renò F., Cannas M. 2006. “UHMWPE and vitamin E bioactivity: An emerging perspective”. *Biomaterials* 27 (16): 3039–3043.
- [9] Halma J.J., Eshius R., Vogely C., van Gaalen S., de Gast A. 2015. “An Un cemented Iso-Elastic Monoblock Acetabular Component Preliminary Results”. *The Journal of Arthroplasty* 30 (4): 615–621.
- [10] Lerf R., Zurbrugg D., Delfosse D. 2010. “Use of vitamin E to protect cross-linked UHMWPE from oxidation”. *Biomaterials* 31 (13): 3643–3648.
- [11] ASTM F732-00(2011), Standard Test Method for Wear Testing of Polymeric Materials Used in Total Joint Prostheses, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org.
- [12] ISO 14242: Implants for surgery -- Wear of total hip-joint prostheses -- Part 1: Loading and displacement parameters for wear-testing machines and corresponding environmental conditions for test.

- [13] Baena J., Wu J., Peng Z. 2015. „Wear Performance of UHMWPE and Reinforced UHMWPE Composites in Arthroplasty Applications: A Review”. *Lubricants* 3 (2): 413–436.
- [14] Teramura S., Sakoda H., Terao T., Endo M.M., Fujiwara K., Tomita N. 2008. „Reduction of wear volume from ultrahigh molecular weight polyethylene knee components by the addition of vitamin E”. *Journal of Orthopedic Research* 26 (4): 460–464.
- [15] Kurtz S.M., ed. 2009. *UHMWPE Biomaterials Handbook: Ultra-high Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices*. Elsevier.
- [13] Baena J., Wu J., Peng Z. 2015. “Wear Performance of UHMWPE and Reinforced UHMWPE Composites in Arthroplasty Applications: A Review”. *Lubricants* 3 (2): 413–436.
- [14] Teramura S., Sakoda H., Terao T., Endo M.M., Fujiwara K., Tomita N. 2008. “Reduction of wear volume from ultrahigh molecular weight polyethylene knee components by the addition of vitamin E”. *Journal of Orthopedic Research* 26 (4): 460–464.
- [15] Kurtz S.M., ed. 2009. *UHMWPE Biomaterials Handbook: Ultra-high Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices*. Elsevier.