

TRYBOLOGICZNE ZUŻYCIE POLIETYLENU UHMWPER

SCHULTE*, B.CLEFF*, A. PAWELEC**, J. OTFINOWSKI***,
B.FRANČZUK***, M. LEKKA****, J. LEKKI****, Z. STACHURA****

* INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS, MÜNSTER, GERMANY

** KLINIKA ORTOPEDII

COLLEGIUM MEDICUM UNIwersYTETU Jagiellońskiego
w KRAKOWIE

*** KLINIKA TRAUMATOLOGII

COLLEGIUM MEDICUM UNIwersYTETU Jagiellońskiego
w KRAKOWIE

**** INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ w KRAKOWIE

Streszczenie

Polietylen o bardzo wysokiej masie cząsteczkowej UHMWPE / Chirulen DIN 58834 / był poddany badaniom na zużycie trybologiczne w urządzeniach typu pin-on-disc i ring-on-disc w powietrzu oraz w środowisku ciekłym. Uzyskane cząsteczki polietylenu będące produktami zużycia miały przeważnie zaokrąglone kształty, a ich wymiary nie przekraczały 500 μm. W tym samym przedziale wielkości zawierały się też rozmiary cząstek o kształtach nieregularnych. Topografia śladów zużycia oraz szorstkości powierzchni były badane przy użyciu skaningowego mikroskopu sił (SFM). Wyniki badań zostały porównane z danymi otrzymanymi na podstawie analizy cząsteczek UHMWPE znalezionych w tkankach pobranych podczas operacyjnej wymiany endoprotez stawu biodrowego.

Słowa kluczowe: polietylen UHMWPE, produkty zużycia, trybologia

Wstęp

Aseptyczne obluźnianie protezy jest częstą i bardzo poważną komplikacją całkowitej alloplastyki stawu biodrowego wymagającą wymiany implantowanej endoprotezy. Tkanki pobrane podczas operacyjnej wymiany endoprotezy zawierają często, obok akrylowych i metalicznych fragmentów, także cząsteczki polietylenu pochodzące ze zużytej panewki polietylenowej. Badanie histologiczne tkanek okołoprotezowych pobranych podczas wymiany endoprotez pokazało, że cząsteczki polietylenu były częściej znajdowane w wypadku aseptycznego obluźniania endoprotezy, niż w przypadku obluźniania spowodowanego infekcją. Rudzki i in. w publikacji [1] zakłada, że aseptyczne obluźnianie protezy może mieć przyczynę w przyspieszonym zużyciu i bardziej intensywnej destrukcji polietylenowej panewki.

W celu poznania procesu zużycia trybologicznego polietylenu i mechanizmu jego destrukcji poddano powierzchnię polietylenu UHMWPE- Chirulen DIN 58834 (Hoechst AG, Oberhausen, Germany) działaniu tarcia w aparacie wyposażonym w metalowy bolec (pin-on-disc) oraz metalowy pierścień (ring-on-disc). Oderwane w wyniku tarcia cząsteczki polietylenu zbadano oceniając ich wielkość i kształt. Zbadano również charakter śladów powstałych wskutek tarcia na powierzchni polietylenu oraz stopień zużycia metalowego bolca użytego jako przeciwciała trące [2].

UHMWPE WEAR BY TRIBOLOGICAL LOAD

R. SCHULTE*, B.CLEFF*, A. PAWELEC**, J. OTFINOWSKI***,
B.FRANČZUK***,
M. LEKKA****, J. LEKKI****, Z. STACHURA****

* INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS, MÜNSTER, GERMANY

** DEPARTMENT OF ORTHOPAEDICS

COLLEGIUM MEDICUM Jagiellonian UNIVERSITY IN CRACOW

*** DEPARTMENT OF TRAUMATOLOGY

COLLEGIUM MEDICUM Jagiellonian UNIVERSITY IN CRACOW

**** INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS IN CRACOW

Abstract

Ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) was tribologically loaded in a pin-on-disk and in a ring-on-disk tribo-tester under dry and wet conditions. PE wear particles were found to be mainly round with dimensions up to 500 μm. Length and thickness of irregularly shaped debris were within this range of dimensions, too. Wear trace topography and roughness were analyzed by means of a scanning force microscope (SFM). The results are compared with the appearance of UHMWPE debris in tissues resected on revision surgery of the total hip replacement.

Key words: polyethylen UHMWPE, wear debris, tribology.

Introduction

Aseptic loosening of the prosthesis is the most common complication in the total hip replacement. Beside acrylic and metallic fragments the tissues resected on revision surgery often contain polyethylene debris originating from the worn acetabulum. The study of the histological appearance of the periprosthetic capsule in failed total hip arthroplasty [1] has shown that polyethylene particles were more often encountered in the case of aseptic implant loosening compared to the loosening due to infection. Rudzki et al [1] assume that the aseptic arthroplasty failure may have its source in an accelerated wear and in a more intense degradation of the polyethylene cup.

In order to gain more insight into wear and degradation of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) on tribological loading we studied debris and wear traces of UHMWPE disks after treatment with a metal rounded pin or a metal ring in a tribo-tester [2].

Methods

UHMWPE disks (15 mm diameter, 2 mm thick) were mounted in a standard pin-on-disk tribo-tester [3]. As a

Metodyka

Cylindryczne dyski UHMWPE o średnicy 15 mm i grubości 2 mm były umieszczane w standardowym urządzeniu do pomiaru siły tarcia [3]. Jako trące przeciwciała używany był bolec o średnicy 4 mm i zaokrąglonym końcu, poruszający się po okręgu o promieniu 5,5 mm, a także pierścień o średnicy zewnętrznej 13 mm i wewnętrznej 9 mm obracający się wokół swego środka. Oba przeciwciała trące wykonane były ze stopu TiV4A16. Obciążenie przeciwciała wynosiło w obu przypadkach 100 g, a względna prędkość liniowa próbki w odniesieniu do bolca i pierścienia miała wartość 3,5 cm/sek. Czas pomiaru wynosił 2 godziny. Testy przeprowadzone były w powietrzu oraz w środowisku ciekłym (roztwory: H₂O i 0,9% NaCl). Każdy test był wykonywany z nowym zestawem próbka - przeciwciała trące.

W przypadku pomiarów dokonywanych w powietrzu cząsteczki polietylenu zbierane były poprzez filtrowanie wody używanej do późniejszego spłukiwania polietylenowych dysków i przeciwciał trących. W przypadku pomiarów dokonywanych w środowisku ciekłym filtrowano płyn używany do eksperymentu. Rozmiary porów w mikrofiltrach zbudowanych z włókien szklanych wynosiły 10 μm, co ograniczało minimalne rozmiary zbieranych cząsteczek. Wielkość i kształt oraz ilość cząsteczek polietylenu oceniano w mikroskopie optycznym.

Uszkodzenia powierzchni polietylenowych dysków były badane poprzez analizę śladów zużycia przy użyciu skaningowego mikroskopu sił/SFM/, przy rozdzielczości w kierunku pionowym ok. 3 nm. Zebrane obrazy pozwoliły na ocenę średniej wartości szorstkości ścieranej powierzchni oraz pomiary głębokości powstających na niej ubytków. Zużycie metalowego bolca zostało ocenione na podstawie obserwacji zmian kształtu jego końcówki oraz objętości jego zużycia.

Wyniki

Wyniki przeprowadzonych testów trybologicznych przedstawiono w tabelach 1-4 oraz na RYSUNKU 1.

TABELA 1-3 oraz RYSUNEK 1 opisują ilość uzyskanych cząsteczek UHMWPE oraz rozkład ich rozmiarów w zależności od środowiska w jakim przeprowadzono testy.

W TABELI 4 przedstawiono wielkość zużycia końcówki metalowego bolca w zależności od środowiska w jakim przeprowadzono eksperyment.

Badania topografii dna śladów wyłobionych podczas różnych testów trybologicznych na powierzchni polietylenu oraz wartości średniokwadratowe szorstkości powierzchni przedstawia TABELA 5. Podano w niej wyniki szorstkości zmierzone w dwóch różnych obszarach śladu oraz maksymalną głębokość śladu również mierzoną w dwóch różnych, wybranych losowo obszarach śladu, których powierzchnia wynosiła każdorazowo 2x2 mm.

| Środowisko Medium | Bolec Pin | Pierścień Ring |
|----------------------|--------------|-------------------|
| suche / dry | 18031 | 106974 |
| H ₂ O | 2646 | 3666 |
| NaCl | 15611 | 2343 |

TABELA 1. Ilość zebranych cząsteczek polietylenu.

TABLE 1. Total number of collected UHMWPE debris particles.

counterbody we took a rounded pin (4 mm diameter) running on a wear trace radius of 5.5 mm as well as a ring (outer diameter 13 mm, inner diameter 9 mm) both made of the TiV4A16 alloy. The load was 100 g in both cases, the relative speed of the turning disk with respect to the fixed pin or ring was 3.5 cm/s. Testing time was 2 h per run. The tests were done in dry as well as in wet (H₂O or 0.9 % NaCl solution) environment. Each test was performed with a new set of disk/metal counterbody.

Polyethylene debris particles were collected by filtering water slurry which resulted from washing the disk/counterbody system after the test in the case of dry friction, or that produced in wet testing. Pore size of glass-fibre microfilters was 10 μm which limited the minimum diameter of the collected wear particles. Size, shape and quantity of the particles were estimated using optical microscope.

Degradation of the polyethylene disks was studied by analysing the topography of wear trace bottom by means of a scanning force microscope (SFM) with vertical resolution of about 3 nm. Mean roughness as well as maximum height of damages were taken from these pictures. Wear volumes of the rounded pins were calculated from the size of degradation areas at the top of pins.

Results

The results of the tribological tests are shown in TABLES 1-4 and in FIGURE 1.

TABLES 1-3 and FIGURE 1 show the amount of UHMWPE debris and particle size distributions found for the different tribological conditions. The wear volumes at the top of the rounded pins after a 2 h run in the tribo-tester are presented in TABLE 4.

Study of wear traces on the UHMWPE disks by SFM was done in order to analyze the topography at the bottom of the traces and to get the mean roughness as well as the maximum height of degradation damages. FIGURE 2 shows some of the SFM images; TABLE 5 gives values of roughness and local damages at two different places of the corresponding wear traces.

| Środowisko Medium | Bolec Pin | Pierścień Ring |
|----------------------|--------------|-------------------|
| suche / dry | 99 % | 91 % |
| H ₂ O | 68 % | 54 % |
| NaCl | 92 % | 93.4 % |

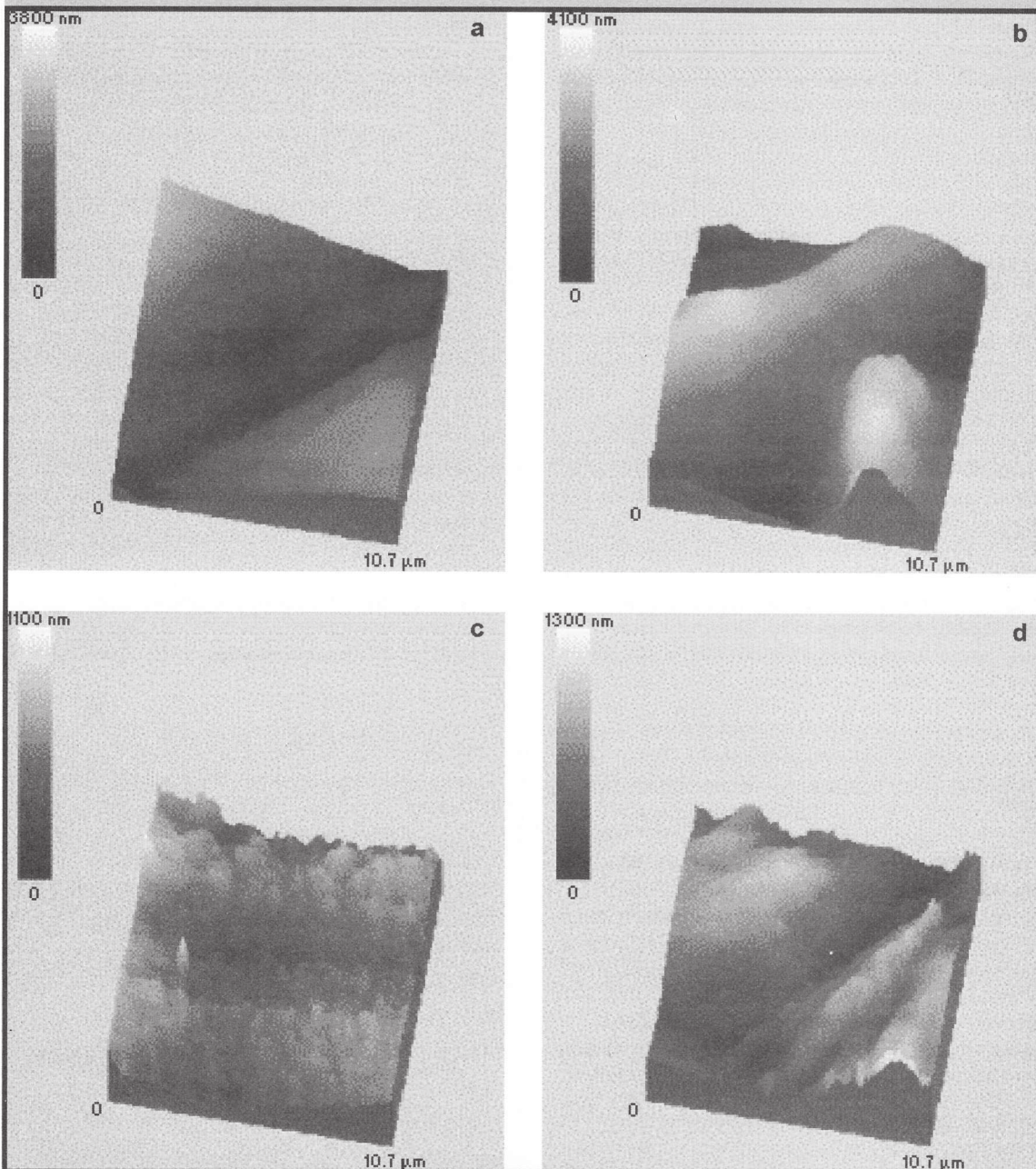
TABELA 2. Odsetek zaokrąglonych cząsteczek polietylenu w materiale uzyskanym podczas testów.

TABLE 2. Percentage of collected UHMWPE debris particles which are round.

| Środowisko Medium | Bolec metalowy Rounded pin | | Pierścień metalowy Ring | |
|----------------------|-------------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| | σ [nm] | h_{max} [nm] | σ [nm] | h_{max} [nm] |
| suche / dry | 99 | 5868 | 1037 | 5918 |
| | 448 | 4032 | 1330 | 6771 |
| H ₂ O | 842 | 6544 | 211 | 1877 |
| | 1698 | 8865 | 130 | 701 |
| NaCl | 164 | 1214 | 357 | 3948 |
| | 100 | 1110 | 345 | 2150 |

TABELA 5. Wartość średniokwadratowa szorstkości powierzchni σ oraz maksymalna głębokość śladów zużycia polietylenu.

TABLE 5. Mean roughness σ and maximum height of damages at the bottom of wear traces.



RYS. 2. Topografia dna śladu wyżłobionego podczas tarcia mierzona z użyciem skaningowego mikroskopu sił (SFM): a) środowisko suche – bolec, b) środowisko suche – pierścień, c) NaCl – bolec, d) NaCl – pierścień.

FIG. 2. Topography of wear trace bottom as measured by SFM: a) dry environment – pin, b) dry – ring, c) NaCl – pin, d) NaCl – ring.

Omówienie

Przeprowadzone testy trybologiczne wskazują, że zużycie polietylenu UHMWPE pod działaniem metalowego przeciwi ciała jest zależne od warunków zwilżania. Wzrasta ono bowiem wyraźnie w warunkach tarcia suchego, na co wskazuje zarówno ilość wyprodukowanych cząstek polietylenu, zwłaszcza w wypadku użycia metalowego pierścienia, jak również stopień zużycia końcówki metalowego bolca. Tworzące się podczas testów trybologicznych cząsteczki polietylenu miały na ogół kształty zaokrąglone. Tworzenie się cząsteczek o bardziej nieregularnych kształtach nasilało się w środowisku wodnym niezależnie od rodzaju przeprowadzanego testu.

W wypadku eksperymentu z bolcem w roztworze NaCl ilość wyprodukowanych cząsteczek polietylenu jest zaskakująco duża w porównaniu z ilością uzyskaną w środowisku wodnym. Może to wynikać z faktu, że cząsteczki UHMWPE powstające w środowisku wodnym są mniejsze niż uzyskiwane w roztworze NaCl. W takiej sytuacji, przy zastosowaniu filtra zatrzymującego cząsteczki większe od 10 μm , całkowita ilość zebranych cząstek w środowisku NaCl będzie większa niż w środowisku wodnym.

Badanie topografii dna śladów tarcia wskazuje na brak korelacji pomiędzy średnią wartością szorstkości ścieranej powierzchni a największą głębokością tworzących się na powierzchni ubytków. Wynika to prawdopodobnie z nierównomiernego ścierania powierzchni polietylenu UHMWPE, co sprawia, że przy stosunkowo niewielkiej średniej szorstkości ścieranej powierzchni pojawiają się na niej pojedyncze głębokie bruzdy widoczne w mikroskopie sił atomowych (RYS.2). Jest to wyraźnie widoczne w testach trybologicznych z użyciem metalowego bolca, a mniej wyraźnie, gdy używano metalowego pierścienia. Takie wyniki eksperymentów można tłumaczyć lokalnym występowaniem w procesie ścierania efektów adhezyjnych i czynnika zmęczeniowego. Jak wynika z TABEL 2 i 3 w wyniku tarcia na powierzchni polietylenu dochodzi do uwalniania z niej małych (10-100 μm) i średnich (100-500 μm) cząsteczek polietylenu, z których większość ma kształty zaokrąglone. Nawiązując do tych wyników można stwierdzić z dużym prawdopodobieństwem, że średnie (100-500 μm) i małe cząsteczki polietylenu, znajdujące we wszystkich przypadkach aseptycznego obłuzowania endoprotez [1] są rezultatem zwiększonego oddziaływania trybologicznego, głównie w sytuacjach, gdy zwilżanie miejsca kontaktu jest zmniejszone, lub zredukowane do zera, nawet na bardzo krótki okres czasu. Można również z dużym prawdopodobieństwem przyjąć, że widoczne często w tkankach okołoprotezowych duże (2-3mm) i nieregularne cząsteczki polietylenu powstają raczej w rezultacie odłamania ich od panewki, niż w wyniku normalnego zużycia trybologicznego.

Należy też zwrócić uwagę na widoczne w testach trybologicznych zużycie metalowego bolca, wyraźne zwłaszcza w środowisku suchym. Powstające bowiem w wyniku tarcia drobne cząsteczki metalu, widoczne również w obrazach histologicznych tkanek okołoprotezowych, znajdując się w strefie bezpośredniego kontaktu metalu z polietylenem mogą powodować zwiększone zużycie panewki polietylenu i powstawanie dużej ilości małych cząsteczek polietylenu, wpływających drażniaco na otaczające tkanki.

Wnioski

- 1) Zużycie trybologiczne polietylenu UHMWPE zależy od warunków zwilżania i wzrasta wyraźnie w warunkach tarcia suchego.
- 2) W wyniku zużycia trybologicznego UHMWPE powstają małe (10-100 μm) i średnie (100-500 μm) cząsteczki polietylenu o zaokrąglonych kształtach.

Discussion

Tribological degradation of UHMWPE by metal counterbody is very sensitive to changes of lubrication. The degradation is rising steeply under dry friction as shown by the amount of produced UHMWPE debris, especially by ring load, as well as by the wear at the top of pins. Debris particles of diameter larger than 10 μm were found to be mainly round-shaped. The number of irregularly shaped particles increased in water for both types of load.

In the case of pin load in NaCl solution the number of collected UHMWPE particles is surprisingly high compared to the number found for pin load in water. This may be due to the fact that we collected only the particles with sizes larger than 10 μm . Total amount of collected debris changes when the size of small particles at the 10 μm threshold changes, i.e. in the case of pin load in NaCl solution the sizes of small particles are slightly greater than in the case of water lubrication.

Wear tracks topography studies show lack of correlation between surface roughness and maximum height of degradation damages. The interpretation of these results is not easy because of large local changes. This reflects dynamics of the degradation process: although the mean roughness in the case of dry pin load is rather small, locally big damages occur which may be due to sticking effects as well as fatigue failure.

TABLES 2 and 3 show that small (10-100 μm) and medium (100-500 μm) particles are released during friction, most of them being round-shaped. Therefore it can be assumed with high probability that medium and small polyethylene particles which were found in all cases of aseptic implant loosening result from the increasing cup degradation, mainly in situations where lubrication is reduced or lost, perhaps only for a short moment. This result suggests also that large polyethylene particles (2-3 mm) result from the breakdown of the acetabulum rather than from normal tribological degradation.

In addition, degradation of the pin surface by local wear (as indicated by metallic fragments found in resected tissues [1]) has to be taken into account because such damages may produce a large number of small debris particles of the polyethylene acetabulum, causing tissue reaction.

Conclusions

- 1) Tribological wear of UHMWPE polyethylene depends on lubrication conditions and increases significantly in dry environment.
- 2) Main wear product of UHMWPE polyethylene consists of small (10-100 μm) and medium (100-500 μm) rounded particles.

Piśmiennictwo

References

- [1]. Rudzki Z., Otfinowski J., Stachura J.: The Histological Appearance of the Periprosthetic Capsule in Failed Total Hip Arthroplasty Depends on the Presence of Polyethylene Acetabulum Destruction, Iliac Bone Damage and Presence of Infection. *Pol. J. Pathol.*, 47, (1996), s. 19-25
- [2]. Schulte R.: Tribometrie von Biomaterialien in der Gelenkprothetik. Diplom Thesis. Institute of Nuclear Physics, Münster, Germany, (1996)
- [3]. Möllerberndt G. J.: Tribometrie von Gold und Titan beschichteten Stählen, DIN X90CrMoV18 und DIN X10CrNiTi18.9. Diplom Thesis. Institute of Nuclear Physics, Münster, Germany, (1992)