Đo độ mòn lót trong của khớp háng toàn phần bằng máy đo 3 chiều

Measurement of Wear of Acetabular Liner by 3D Coordinate Measuring Machine

Phạm Ngọc Tuấn[1*], Nguyễn Văn Tường[2]

[1]Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Tp. HCM, 268 Lý Thường Kiệt, Quận 10, Tp. HCM

[2]Trường Đại học Nha Trang, 02 Nguyễn Đình Chiểu, Nha Trang, Khánh Hòa

Đến Tòa soạn: 20-8-2018; chấp nhận đăng: 27-9-2019

Tóm tắt

Mòn là một trong những nhân tố quan trọng để đánh giá chất lượng và tuổi thọ của khớp háng toàn phần (KHTP). Bài báo trình bày quá trình thử nghiệm mòn lót trong làm bằng nhựa polyetylen phân tử lượng siêu cao (UHMWPE) của KHTP chế tạo tại Việt Nam. Độ mòn của lót trong được xác định bằng phương pháp thể tích theo tiêu chuẩn ISO 14242-2. Thể tích của hốc lót trong sẽ được đo trước khi bắt đầu thử nghiệm mòn và tại các thời điểm thích hợp trong quá trình thử nghiệm. Máy đo tọa độ ba chiều (CMM) được sử dụng để xác định tọa độ các điểm trên bề mặt của hốc. Từ dữ liệu đo này, mô hình 3 chiều của hốc lót trong được xây dựng để tính thể tích của nó trong trước và sau một số lần thử mòn. Kết quả thử nghiệm mòn cho thấy độ mòn trung bình của lót trong là 29,4 $mm^3/10^6$ chu kỳ. So với các nghiên cứu đã công bố, lót trong của nghiên cứu này có độ mòn thấp và nằm trong dải độ mòn điển hình của các lót trong cùng loại.

Từ khóa: Độ mòn, ISO 14242-1, ISO 14242-2, khớp háng toàn phần, lót trong.

Abstract

Wear is one of important factors to evaluate the quality and service life of total hips. This paper presents the wear test of a UHMWPE acetabular liner which was made in Vietnam. The wear of the acetabular liner was defined by the dimensional change method according to ISO 14242-2. The volume of the acetabular cavity was measured prior to the start of the wear test and at suitable intervals during the test. A coordinate measuring machine was used to get the coordinates of points on the surface of the acetabular cavity. From the measured data, the 3-dimensional model of the acetabular cavity was created to calculate its volume before and after several wear tests. The results of the wear test showed that the average wear of the acetabular liner is 29,4 $mm^3/10^6$ cycles. Compared to some published studies, the acetabular liner of this study had a low wear and was in the range of typical wear of similar acetabular liners.

Keywords: Wear, ISO 14242-1, ISO 14242-2, Total hip, Acetabular liner.

1. Mở đầu

Thay KHTP là một phẫu thuật thay thế khớp háng tự nhiên bị hư hỏng bằng KHTP nhằm phục hồi chức năng vốn có của khớp háng tự nhiên. KHTP hiện đại gồm 4 chi tiết là chuôi, chỏm, lót trong và vỏ ngoài. Vỏ ngoài và lót trong tạo thành ổ cối nhân tạo trong đó vỏ ngoài được gắn cố định vào ổ cối của xương chậu, lót trong gắn cố định với vỏ ngoài. Chỏm có dạng hình cầu, mặt ngoài tiếp xúc với mặt trong của lót trong, mặt trong là lỗ côn liên kết với chuôi. Thân chuôi được gắn cố định vào vùng tủy của xương đùi, đầu kia của chuôi lắp với chỏm.

Ngày nay người ta sử dụng nhiều loại vật liệu y sinh phù hợp làm KHTP bao gồm vật liệu kim loại (như hợp kim titan, hợp kim coban…), gốm và nhựa polyetylen. Tuy đã có nhiều cải tiến về vật liệu nhưng trong quá trình làm việc, do ma sát, việc mòn khớp vẫn không thể tránh khỏi. Điều này trở thành một vấn đề quan trọng trong lâm sàng [1]. Người ta thấy các hạt mài mòn kim loại đã khuếch tán trong cơ quan khác nhau như hạch bạch huyết, gan, lá lách và tủy xương, có thể gây hoại tử mô [2]. Các hạt mài mòn polyetylen gây nên thoái hóa khớp và tiêu xương và vì thế làm lỏng KHTP [3-5]. Khi KHTP bị lỏng, cần phải phẫu thuật để thay thế KHTP mới. Quá trình này phức tạp, đắt tiền và nguy hiểm. Do đó, cho dù sử dụng vật liệu y sinh nào làm KHTP, cần phải nghiên cứu tốc độ mài mòn của KHTP. Việc này đã trở thành một khía cạnh quan trọng trong việc xác nhận tiền lâm sàn chi tiết cấy ghép [5].

Trong khuôn khổ đề tài cấp Nhà nước "Nghiên cứu thiết kế, chế tạo và thử nghiệm khớp háng nhân tạo toàn phần", mã số KC.03.24/11-15, một số bộ KHTP cho người Việt lần đầu tiên đã được chế tạo. Trước khi thực hiện thử nghiệm lâm sàn, các chi tiết của KHTP cần được thử nghiệm cơ y sinh với nhiều nội dung khác nhau. Bài báo này trình bày quá trình thử nghiệm và đo mòn lót trong của KHTP theo tiêu

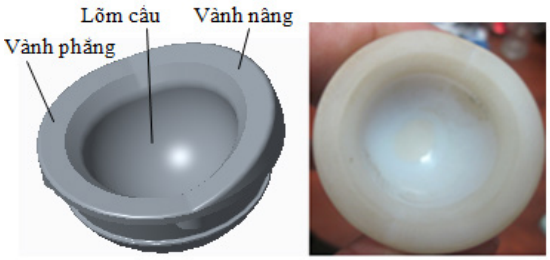
[*] Địa chỉ liên hệ: Tel: (+84) 903.678.459
Email: phamngoctuan.vn@gmail.com

chuẩn ISO 14242-2. Kết quả đo độ mòn được xác định bằng phương pháp thể tích nhờ máy đo 3 chiều.

2. Vật liệu và phương pháp

2.1 Mẫu thử mòn

Trong nghiên cứu này, KHTP gồm các chi tiết vỏ ngoài, lót trong, chỏm và chuôi làm bằng hợp kim titan Ti-6Al-4V. Chỏm có đường kính 28 mm. Độ nhám bề mặt của chỏm sau khi gia công là R_a = 0,032 µm, đạt yêu cầu theo tiêu chuẩn ASTM F2033-12. Lót trong làm bằng nhựa polyetylen phân tử lượng siêu cao UHMWPE. Vật liệu này có độ cứng là 61 Shore D, hệ số ma sát là 0,25, độ bền kéo là 20 MPa, mô đun đàn hồi là 700 MPa [6]. Mặt trong của lót trong là hốc có dạng lõm cầu đường kính 28 mm, có độ nhám R_a = 0,01 µm (thỏa mãn tiêu chuẩn ASTM F2033−12). Ngoài vành phẳng, phần đáy của lót trong còn có phần vành nâng chiếm một cung 180^0 theo chu vi. Mô hình CAD (Computer Aided Design) và mẫu thật của lót trong được trình bày trên hình 1.



Hình 1. Mô hình CAD và mẫu thật của lót trong.

2.2 Máy thử nghiệm mòn

Thiết bị mô phỏng khớp háng được sử dụng chủ yếu cho các nghiên cứu về ma sát học các khớp háng nhân tạo. Trên thiết bị này, KHTP được thử nghiệm trong một môi trường mô phỏng các điều kiện sinh lý học [5]. Thiết bị mô phỏng khớp háng rất đa dạng về thiết kế. Một số thiết bị chỉ có vai trò như là một máy thử nghiệm mòn dùng cho thử nghiệm ma sát và mài mòn giữa các chi tiết trong khớp háng nhân tạo.

Trong nghiên cứu này, thiết bị mô phỏng khớp háng chỉ có vai trò như là một máy thử nghiệm mòn. Máy được thiết kế theo tiêu chuẩn ISO 14242-1. Máy có tải dọc trục lớn nhất là 3 kN. Máy có thể tạo được 3 chuyển động của khớp háng theo tiêu chuẩn ISO 14242-1: dạng ra-khép vào ($-4^0 \div +7^0$) $\pm 3^0$, xoay trong-ngoài ($+2^0 \div -10^0$) $\pm 3^0$, co-duỗi ($-18^0 \div +25^0$) $\pm 3^0$. Máy được mô tả trên hình 2, KHTP được gá đặt đúng với tư thế làm việc của khớp háng tự nhiên. Quá trình thử nghiệm trên máy được diễn ra trong nhiệt độ $37^0C \pm 2^0C$ trong môi trường chất lỏng thử nghiệm.

2.3 Dung dịch thử nghiệm

Theo tiêu chuẩn ISO 14242-1 thì dung dịch dùng để thử nghiệm là huyết thanh bê pha loãng với nước cất với hàm lượng protein đạt 30 g/l ± 2 g/l [7]. Một số nhà khoa học sử dụng huyết thanh bê hoặc huyết thanh bê mới sinh pha với nước cất với nồng độ theo hướng dẫn của ISO 14242-1 hoặc pha loãng đến 25% để làm dung dịch thử nghiệm [8-11]. Dung dịch thử nghiệm được thay sau mỗi 300.000, 330.000 hoặc 500.000 chu kỳ [8-11]. Nghiên cứu này sử dụng dung dịch huyết thanh bê mới sinh Sigma-N4762 (Mỹ) pha loãng đến 25% trong nước cất. Dung dịch thử nghiệm này được thay sau mỗi 500.000 chu kỳ.

Hình 2. Máy thử nghiệm mòn.

2.4 Quy trình thử mòn

Quy trình thử mòn được tiến hành theo tiêu chuẩn ISO 14242-1, gồm các bước cơ bản sau [7]:

1. Đo thể tích của hốc lót trong khi thử mòn.
2. Làm sạch các mẫu thử.
3. Lắp mẫu thử lên máy thử mòn.
4. Cấp dung dịch thử nghiệm để ngâm hoàn toàn bề mặt tiếp xúc của mẫu thử.
5. Khởi động và điều chỉnh máy thử mòn để xác định tải dọc trục (3 kN) và các chuyển động góc. Ghi lại các chuyển động góc và tải dọc trục dạng sóng lúc khởi động và sau mỗi lần thay dung dịch thử nghiệm.
6. Vận hành máy ở tần số 1 Hz ± 0,1 Hz.
7. Thêm dung dịch thử nghiệm bị tổn thất do bay hơi khi thử nghiệm ít nhất mỗi ngày. Thay hoàn toàn chất lỏng thử nghiệm sau ít nhất $5x10^5$ chu kỳ.
8. Ngừng thử nghiệm để đo mòn sau mỗi $1x10^6$ chu kỳ cho đến khi thử nghiệm kết thúc.
9. Lấy mẫu thử từ máy thử mòn và đo độ mòn.
10. Sau khi đo độ mòn, làm sạch các mẫu thử và cài đặt lại máy thử mòn.
11. Tiếp tục thử nghiệm cho đến khi một trong các vấn đề sau xảy ra: (a) hoàn thành 5 x 10^6 chu kỳ, (b) nứt vỡ hoặc tách lớp các bề mặt chịu tải, (c) các

thông số tải và chuyển vị của máy thử mòn vượt quá dung sai cho phép.

Lặp lại bước 6 đến bước 11 cho đến khi thử nghiệm kết thúc.

Khi thử nghiệm mòn, lót trong và chỏm được làm sạch và xử lý theo hướng dẫn về xử lý mẫu nêu trong tiêu chuẩn ISO 14242-2.

2.5 Đo độ mòn

2.5.1 Phương pháp xác định độ mòn

Theo tiêu chuẩn ISO 14242-2, độ mòn lót trong của KHTP có thể được đo bằng phương pháp trọng lượng hoặc phương pháp thể tích. Phương pháp thể tích được sử dụng rộng rãi hơn so với phương pháp trọng lượng do bên cạnh xác định thể tích mòn thì phương pháp thể tích còn đánh giá được vết mòn. Nghiên cứu này áp dụng phương pháp thể tích để đo độ mòn lót trong. Nguyên tắc của phương pháp thể tích như sau [12]: dùng máy CMM để lập bản đồ bề mặt hốc của lót trong của KHTP trước khi bắt đầu thử nghiệm mòn và tại các thời điểm thích hợp trong quá trình thử nghiệm. Từ dữ liệu này, sự thay đổi thể tích giữa các lần đo được xác định. Như vậy, theo tiêu chuẩn này, để xác định lượng mòn, cần phải có hình học tham chiếu của mẫu thử chưa mòn dùng để so sánh với hình học mẫu thử đã bị mòn. Do đó phần hốc của mẫu thử cần được đo thể tích trước và sau khi thử nghiệm mòn một số chu kỳ. Hai bộ dữ liệu đo liên tiếp nhau sẽ được so sánh để xác định độ mòn theo số chu kỳ.

Độ mòn của lót trong (ΔV_n) được tính theo thể tích của hốc lót trong khi thử mòn (V_0) và sau khi thử mòn n chu kỳ (V_n) như sau [12]:

$$\Delta V_n = V_n - V_0 \quad (1)$$

2.5.2 Máy CMM

Tiêu chuẩn ISO 14242-2 quy định máy CMM dùng đo để lập bản đồ bề mặt hốc của lót trong có độ chính xác là (4 + 4L/1000) µm, với L là chiều dài đo, hoặc máy có độ chính xác cao hơn [12]. Nghiên cứu này sử dụng máy CMM Beyond A504 (Mitutoyo, Nhật Bản) để đo mòn. Máy này có độ chính xác là (1,7 + 4L/1000) µm, độ phân giải là 0,1 µm, đường kính đầu đo là 1,5 mm. Hình 3 minh họa việc đo bề mặt lõm cầu của lót trong trên máy CMM.

2.5.3 Phương pháp đo và xử lý số liệu

Tiêu chuẩn ISO 14242-2 đưa ra quy định đo thể tích hốc lót trong trên máy CMM như sau:

1. Làm sạch mẫu đo, bảo quản mẫu ở nhiệt độ phòng thí nghiệm ít nhất 48 giờ.

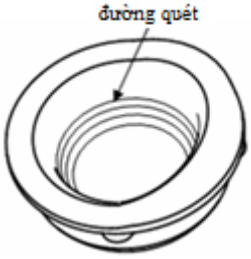
2. Xác định điểm gốc tọa độ và mặt phẳng tham chiếu trên mẫu đo.

3. Đo theo lưới đường viền trên bề mặt hốc của lót trong. Đảm bảo rằng khoảng cách lưới không lớn hơn 1 mm trong mặt phẳng nằm ngang.

4. Tính thể tích hốc của lót trong.

Hình 3. Đo bề mặt trong lót trong trên máy CMM.

Theo tiêu chuẩn này, trước khi tiến hành xác định tọa độ các điểm trên mặt hốc của lót trong, phải thiết lập mặt phẳng chuẩn XY, các trục X, Y và gốc tọa độ trên lót trong. Trong nghiên cứu này, mặt phẳng tại vùng vành phẳng của lót trong được dùng làm mặt phẳng tham chiếu (hình 1). Máy CMM Beyond A504, có phần mềm MCOSMOS 2.3 kèm theo, được lập trình để thực hiện quét liên tục các đường đo theo mặt hốc. Các đường viền đo theo phương vỹ tuyến của hốc (hình 4) cách nhau một khoảng 0,5 mm theo phương thẳng đứng (phương trục Z). Điểm đáy hốc cũng được xác định.

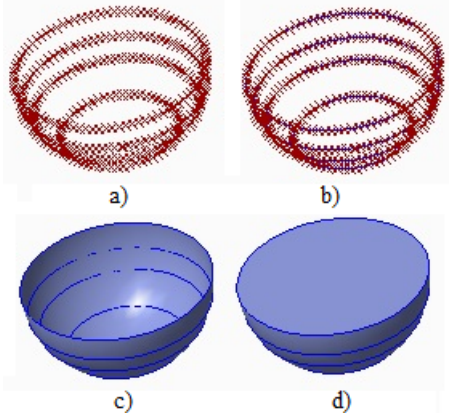


Hình 4. Phương các đường quét.

Dữ liệu đo của từng đường quét được lưu trong các tập tin văn bản chứa thông tin về tọa độ X, Y và Z của các điểm đo. Dữ liệu này có thể được sử dụng để tính thể tích hốc của lót trong bằng cách sử dụng phần mềm toán như Matlab [13], MathCAD [14] hoặc phần mềm CAD thương mại như Rhinoceros [15], CADKEY [16]... Khi sử dụng các phần mềm toán, cần phải xây dựng chương trình con để mô tả mặt từ các tọa độ điểm đo và tính thể tích không gian của hốc. Việc này đòi hỏi người tính toán phải có kỹ năng lập trình với phần mềm tương ứng được sử dụng. Khi sử dụng các phần mềm CAD thương mại, quá trình xây dựng mặt và tính thể tích đơn giản hơn.

Nghiên cứu này sử dụng phần mềm Creo Parametric 3.0 để xây dựng bề mặt hốc của lót trong. Ở đây, dữ liệu đo của từng đường quét được chuyển

sang dạng tập tin văn bản có phần mở rộng là ".pts" để tạo các đường cong trong không gian. Từ các đường cong này và điểm đáy hốc, mô hình CAD bề mặt hốc của lót trong có thể được xây dựng (dùng lệnh *Boundary Blend* và *Merge*). Bề mặt này được làm kín và chuyển sang dạng khối (dùng lệnh *Solidify*) để tính thể tích. Hình 5 minh họa các bước cơ bản của quy trình tạo thể tích của hốc gồm: tạo các điểm chuẩn, tạo đường cong, tạo mặt và hóa khối.



Hình 5. Các bước tạo thể tích lõm của lót trong từ dữ liệu đo trên máy CMM.

3. Kết quả và thảo luận

Kết quả đo độ mòn của chi tiết lót trong sau 1, 2, 3, 4 và 5 triệu chu kỳ lần lượt là 29, 33, 28, 30 và 27 mm^3. Độ mòn trung bình của lót trong là 29,4 $mm^3/10^6$ chu kỳ. Bảng 1 so sánh độ mòn trung bình của lót trong UHMWPE khi ma sát với chỏm đường kính 28 mm làm từ một số vật liệu khác nhau.

Bảng 1. So sánh độ mòn của lót trong

Tác giả	Vật liệu chỏm	Độ mòn, $mm^3/10^6$ chu kỳ
Nghiên cứu này	Ti-6Al-4V	29,4
Kaddick và Wimmer [8]	Gốm BIOLOX	22,5
Smith và Unsworth [19]	ZrO2 CoCrMo	41,0 51,4
Barbour và ctv [20]	ZrO2	30,0
Halma và ctv [21]	CoCr	31,0

Nói chung, độ mòn thể tích của lót trong bằng nhựa polyethylen chủ yếu phụ thuộc vào kích thước và vật liệu của chỏm và lót trong [17]. Khi tăng đường kính chỏm từ 28 mm đến 36 mm, có thể tăng gấp đôi độ mòn [18]. Trong các nghiên cứu [19-21], khi sử dụng chỏm bằng CoCrMo và ZrO_2, giá trị mòn của lót trong từ 30 $mm^3/10^6$ chu kỳ đến 51,4 $mm^3/10^6$ chu kỳ. Kaddick và Wimmer [8] thử nghiệm độ mòn của lót trong Plasmacup bằng nhựa UHMWPE (hãng Aesculapm, Mỹ) khi lắp với chỏm gốm BIOLOX-forte (hãng CeramTec, Đức) có đường kính 28 mm. Kết quả thử nghiệm mòn cho thấy lượng mòn của lót trong là 22,07 $mg/10^6$ chu kỳ, tương ứng với 22,5 $mm^3/10^6$ chu kỳ.

Như vậy, tốc độ mòn của lót trong của nghiên cứu này thấp hơn tốc độ mòn của các nghiên cứu [19-21] nhưng cao hơn tốc độ mòn trong nghiên cứu [8]. Sở dĩ có sự khác nhau này là do tốc độ mòn của lót trong còn phụ thuộc yếu tố như vật liệu làm chỏm, trạng thái bề mặt tiếp xúc của chỏm và lót trong và dung dịch thử nghiệm. Độ mòn điển hình của lót trong polyetylen khi lắp với chỏm kim loại đường kính 28 mm trong khoảng 20–150 $mm^3/10^6$ chu kỳ [22]. Như vậy, tốc độ mòn của lót trong của nghiên cứu này là thấp và nằm trong dải tốc độ mòn điển hình của các lót trong cùng loại. Do đó, có thể nhận định rằng lót trong cũng như chỏm của nghiên cứu này được thiết kế và chế tạo với đặc tính mòn của bề mặt chịu tải tương tự như một số sản phẩm thương mại và sản phẩm nghiên cứu cùng loại.

Nghiên cứu này tuân thủ theo quy trình đo thể tích hốc theo tiêu chuẩn ISO 14242-2. Tuy nhiên tiêu chuẩn này chỉ quy định đo kích thước hốc của lót trong theo phương vĩ tuyến khi đo trên máy CMM. Do đó mô hình CAD của mặt hốc của lót trong có thể chưa phản ánh đúng bề mặt thực của nó, vì thế có thể chưa tính toán chính xác độ mòn. Để nâng cao độ chính xác khi tái tạo bề mặt hốc của lót trong, có thể kết hợp đo theo phương vĩ tuyến và kinh tuyến của hốc như trong nghiên cứu [12]. Ngoài ra, có thể thiết lập bước nhảy theo chiều trục Z là 0,25 mm khi đo bề mặt hốc của lót trong trên máy đo CMM. Tuy nhiên, trường hợp này sẽ làm tăng điểm đo và quá trình xây dựng mô hình CAD bề mặt hốc của lót trong sẽ tốn thời gian hơn. Một số nghiên cứu chỉ ra rằng độ chính xác bé nhất của máy CMM khi đo mòn thể tích phải là 2 µm [23]. Trong nghiên cứu này, với chiều dài đo là 28 mm, khi đó độ chính xác của máy CMM Beyond A504 là bé hơn 1,9 µm. Tuy nhiên đo CMM có thể có các sai số do chiến lược đo, rà đầu đo, xác định hình học tham chiếu và tính toán thông qua phần mềm. Các sai số này cần được đánh giá để xác định sai số của phương pháp đo.

4. Kết luận và khuyến nghị

Thử nghiệm mòn chi tiết lót trong của KHTP là một thử nghiệm quan trọng để có được những thông tin hữu ích nhằm hoàn thiện thiết kế KHTP. Bài báo trình bày quá trình thử nghiệm mòn chi tiết lót trong làm bằng vật liệu nhựa UHMWPE khi lắp với chỏm Ti-6Al-4V của KHTP được chế tạo tại Việt Nam. Quá trình thử nghiệm mòn và xác định thể tích mòn của lót trong được thực hiện theo các theo tiêu chuẩn ISO 14242-1 và ISO 14242-2. Kết quả đo mòn cho thấy lót trong có độ mòn thấp và nằm trong dải độ mòn điển hình của các lót trong cùng loại đã được công bố. Để nâng cao độ tin cậy của việc thử nghiệm,

cần tiến hành thử nghiệm mòn thêm một số cặp chỏm-lót trong và cần đánh giá sai số của phương pháp đo.

Lời cám ơn

Công trình được thực hiện trong khuôn khổ đề tài KH&CN cấp nhà nước, mã số KC03.24/11-15 tại Phòng thí nghiệm trọng điểm quốc gia về Điều khiển số và Kỹ thuật hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh.

Tài liệu tham khảo

[1] Hung J.P., Wu James S.S. , A comparative study on wear behavior of hip prosthesis by finite element simulation, Biomedical Engineering-Applications, Basis & Communications, 14, 4 (2002) 139-148.

[2] Case C.P., Langkamer V.G., James J., Palmer M.R., Kemp A.J., Heap P.F., Solomom L., Widespread dissemeniation of metal debris from implants, J Bone Joint Surg, 76b (1994) 701-712.

[3] Khalily C., Tanner M.G., Williams V.G., Whiteside L.A. (1998), Effect of locking mechanism on fluid and particle flow through modular acetabular components, J Arthroplasty, 13, 3 (1998) 254-258.

[4] Margaret A.M., Donald W.H., Kerry C., David R.H., Corinna I. W., Mark J, P., Jean D. M., Implant retrieval studies of the wear and loosening of prosthetic joints: a review, Wear, 241, 2 (2000)158–165.

[5] Nikolaos I.G., Dimitrios E.M., Design of a hip joint simulator according to the ISO 14242, Proceedings of the World Congress on Engineering; London; 2011; 2088 – 2093.

[6] Lisa A. P., Ayyana M. C., Mechanics of Biomaterials Fundamental Principles for Implant Design, pp 442, Springer, 2 Ed, 2015.

[7] International Standard, ISO 14242-1 -Implants for Surgery-wear of total hip- joint prothese, Part 1: Loading ang displacement paramenter for wear-testing machines and corresponding environmental conditons for test, 2008.

[8] Kaddick C.,Wimmer M.A., Hip simulator wear testing according to the newly introduced standard ISO 14242, Journal of Biomechanics, 38(2005) 641–642.

[9] Fabry C., Zietz C., Baumann A., Bader R., Wear performance of sequentially cross linked polyethylene inserts against ion-treated CoCr, TiNbN-coated CoCr and Al2O3 ceramic femoral heads for total hip replacement, Lubricants, 3(2015) 14-26.

[10] Hajjar M.A.; Wear of hard-on-hard hip prostheses: influence of head size, surgical position, material and function; The University of Leeds School of Mechanical Engineering 2012.

[11] Stewart T.D., Tipper J.L., Insley G., Streicher R.M., Ingham E., Fisher J., Long-term wear of ceramic matrix composite materials for hip prostheses under severe swing phase microseparation, J Biomed Mater Res B Appl Biomater, 66, 2 (2003) 567-573.

[12] International Standard, ISO 14242-2 - Implants for Surgery-wear of total hip- joint prothese, Part 2: Methods of measurement, 2012.

[13] Lord J.K., Langton D.J., Nargol A.V.F., Joyce T.J., Volumetric wear assessment of failed metal-on-metal hip resurfacing prostheses, Wear, 272 (2011) 79– 87.

[14] Becker A., Schöllhorn K., Dirix Y., Schmotzer H.; Metal-on-metal bearings i: the influence of 3D measurement accuracy on the calculated wear of a ball head using a new mathematical approach; Proceedings of the 52nd Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society; Chicago; 2006.

[15] Goldvasser D.1., Hansen V..J, Noz M.E., Maguire G.Q.Jr , Zeleznik M.P., Olivecrona H., Bragdon C.R., Weidenhielm L, Malchau H., In vivo and ex vivo measurement of polyethylene wear in total hip arthroplasty: Comparison of measurements using a CT algorithm, a coordinate-measuring machine, and a micrometer, Acta Orthop, 85, 3 (2014) 271–275.

[16] Hui A.J., McCalden R.W., Martell J.M., MacDonald S.J., Bourne R.B., Rorabeck C.H., Validation of two and three-dimensional radiographictechniques for measuring polyethylene wear after total hip arthroplasty, J Bone Joint Surg Am, 85A, 3 (2003) 505-511.

[17] Fisher J., Dowson D., Tribology of artificial joints, P I MECH ENG H, 205, 2 (1991) 73-79.

[18] Fisher J., Jin Z., Tipper J., Stone M., Ingham E., Tribology of alternative bearings, Clin. Orthop. Relat. Res., 453(2006) 25-34.

[19] Smith S.L., Unsworth A., A comparison between gravimetric and volumetric techniques of wear measurement of UHMWPE acetabular cups against zirconia and cobalt-chromium-molybdenum femoral heads in a hip simulator, P I MECH ENG H, 213 (1999) 475-483.

[20] Barbour P.S.M., Stone M.H., Fisher J., A hip joint simulator study using loading and motion cycles generating physiological wear paths and rates, P I MECH ENG H, 213 (1999) 455–467.

[21] Halma J.J., Señaris J., Delfosse D., Lerf R., Oberbach T., van Gaalen S.M., de Gast A., Edge loading does not increase wear rates of ceramic-on-ceramic and metal-on-polyethylene articulations, J Biomed Mater Res B Appl Biomater, 102, 8 (2014) 1627-1638.

[22] Jasty M., Goetz D.D., Bragdon C.R., Lee K.R., Hanson A.E., Elder J.R., Harris W.H., Wear of Polyethylene Acetabular Components in Total Hip Arthroplasty. An Analysis of One Hundred and Twenty-eight Components Retrieved at Autopsy or Revision Operations, J Bone Joint Surg Am, 79,3 (1997) 349 -358.

[23] Sagbasa B., Durakbasa M.N, Measurement of wear in orthopedic prosthesis, Acta Physica Polonica A, 121, 1 (2012) 131-134.