

Zastosowanie inżynierii odwrotnej w projektowaniu spersonalizowanego implantu stawu biodrowego

Application of reverse engineering for design of personalized hip implant

JAROSŁAW ZUBRZYCKI
MAGDALENA BRANIEWSKA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.1.5>

Przedstawiono metodologię projektowania spersonalizowanej protezy stawu biodrowego człowieka z wykorzystaniem metod inżynierii odwrotnej (RE) w oparciu o badania obrazowe pacjenta wykonane techniką tomografii komputerowej (CT). Zaprezentowano wyniki analiz numerycznych badań wytrzymałościowych implantu przeprowadzonych MES.

SŁOWA KLUCZOWE: implant stawu biodrowego, CAD, MES, modelowanie, inżynieria odwrotna

In the paper has been presented a methodology for designing personalized human hip prosthesis using Reverse Engineering methods based of the patient computed tomography (CT) studies. Are presented the results of numerical analyzes of strength tests received implants from FEM.

KEYWORDS: hip-joint implant, CAD, FEM, modeling, reverse engineering

Implantologia i protetyka stawu biodrowego rozwijają się prężnie od ponad 40 lat. Całkowita bądź częściowa endoprotezoplastyka należy do najczęściej przeprowadzanych zabiegów. Zabieg wykonywany jest zarówno u ludzi starszych (uszkodzenia związane z procesem starzenia się), jak i młodych (kontuzje). Wszczepienie całkowitej protezy młodej osobie wiąże się z nawet kilkukrotną koniecznością jej wymiany. Aby zwiększyć żywotność protezy, tworzy się nowe, spersonalizowane rozwiązania konstrukcyjne, przeprowadza się innowacyjne testy w warunkach anatomicznych oraz sięga się po coraz lepsze biomateriały.

Ważne w projektowaniu i wykonaniu spersonalizowanej protezy jest jej dostosowanie do wymiarów anatomicznych pacjenta. Aby spełnić te wymagania, należy uzyskać dokładne wymiary uszkodzonego stawu. W tym celu wygodne jest wykorzystanie badań CT, na podstawie których w programach CAD można zaprojektować spersonalizowaną protezę.

Biomechanika stawu biodrowego

Staw to ruchome połączenie kości. Staw biodrowy przenosi największe obciążenia, torebka stawowa wraz z kompletem więzadeł może przenieść obciążenie nawet do 500 kg [2–4]. Staw biodrowy jest przegubem kulistym o trzech stopniach swobody w płaszczyznach: poprzecznej (ruch zgjęcia i wyprost), strzałkowej (odwodzenie i przywodzenie) oraz pionowej (nawracanie i odwracanie) i jednym z większych węzłów kinematycznych w układzie ruchu człowieka [3]. Struktura oddziaływań na staw biodrowy jest bardzo złożona, składa się na nią szereg sił i momen-

tów wynikających z masy ciała i działania poszczególnych grup mięśni. Jego funkcją jest także przekazywanie obciążeń z kręgosłupa poprzez miednicę do kończyn dolnych w trakcie ruchu. Nagłe obciążenie może doprowadzić do przekroczenia wytrzymałości tkanki kostnej i przerwania jej struktury – złamania. Zmiany zwyrodnieniowe powstają zaś wskutek powolnych, długotrwałych obciążeń. Spośród sił działających na kość udową można wyróżnić: siły działające w stawie (na główkę kości udowej oraz kłykiec stawu kolanowego), oddziaływania mięśni, oddziaływania więzadeł oraz siły bezwładności.

W wyniku oddalenia główki kości udowej od osi trzonu powstaje ramię, co powoduje występowanie momentu gnącego. W rzeczywistym układzie obciążeń, kość poza zginaniem ulega także ścisnaniu i skręcaniu.

Relacje obciążeń zachodzących w stawie biodrowym przedstawia się w znacznym uproszczeniu za pomocą dźwigni dwuramiennej, w której punkt podparcia znajduje się w środku stawu biodrowego [1].

Analiza ta jest w przybliżeniu poprawna tylko wtedy, gdy środek ciężkości ciała umiejscowiony jest w płaszczyźnie czołowej. Jakikolwiek ruch powoduje zmianę położenia środka ciężkości, co wywołuje zmianę kierunków i wartości sił pochodzących od mięśni utrzymujących ciało w stanie równowagi.

Modelowanie implantu stawu biodrowego

Protezę stawu biodrowego można dobrać dla konkretnego pacjenta w oparciu o wyniki tomografii komputerowej. Proteza została zaprojektowana dla 23-letniego mężczyzny o wadze 85 kg i wzroście 180 cm, po urazie mechanicznym stawu biodrowego, skierowanego do całkowitej alloplastyki. Aby dopasować implant, trzeba dobrać parametry geometryczne, które zapewnią prawidłową, anatomiczną biomechanikę stawu. Metoda modelowania oraz analizy symulacyjnej badanej endoprotezy obejmuje:

- wirtualne odwzorowanie anatomicznego układu kostno-stawowego stawu biodrowego na podstawie badań CT,
- model 3D bezcementowej protezy stawu biodrowego,
- analizę obciążeń implantu (MES).

Do analizy stanu naprężeń i odkształceń wywołanych w protezie stawu biodrowego można przyjąć model obciążenia stawu biodrowego według modelu Będzińskiego [1]. Uwzględnia on oddziaływanie mas tułowia na główkę kości udowej R , oddziaływanie mięśni odwodźcicieli M_a , reakcję pasma biodrowo-piszczelowego M , ślizganie po krętarzu T rotatorów R_u i reakcję od podłoża R_p (rys. 1).

Na potrzeby modelu można przyjąć uproszczony schemat obciążeń uwzględniający jedynie wypadkową sił od oddziaływania mięśni na staw biodrowy. Wartości siły wypadkowej F , reakcja mięśni M_a , T , M , a także reakcja podłoża R_p zależą bezpośrednio od masy pacjenta.

* Dr inż. Jarosław Zubrzycki (j.zubrzycki@pollub.pl) – Politechnika Lubelska, Wdział Mechaniczny, Zakład Inżynierii Biomedycznej; mgr inż. Magdalena Braniewska (braniewska.m@gmail.com) – Politechnika Lubelska, Wdział Mechaniczny

Anatomiczne struktury kostno-stawowe pacjenta odwzorowano na podstawie obrazowania CT. Wykorzystano 64-rzędowy tomograf komputerowy – Philips Medical Systems, Ingenuity Core 128, i wykonano cyfrowe obrazy odcinka lędźwiowego (rys. 2).

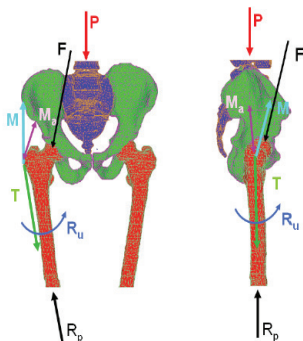
Po segmentacji tkanek na obrazie został wygenerowany przestrzenny model stawu biodrowego (rys. 3).

Modele z rys. 3 posłużyły do zdjęcia wymiarów anatomicznych pacjenta. Po wyeksportowaniu do CAD (CATIA) wykonano modele bryłowe trzpienia oraz głowy implantu.

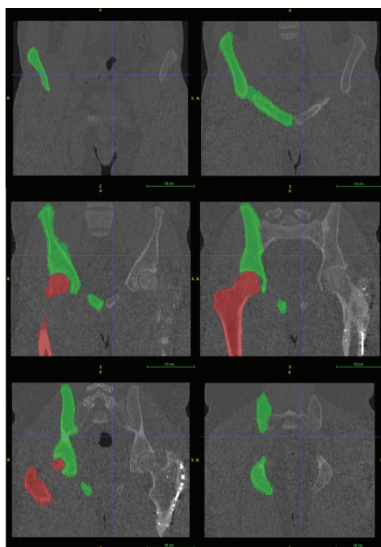
Tak zaprojektowany model numeryczny implantu poddano analizie wytrzymałościowej MES. Do badań numerycznych wykorzystano materiały:

- endoproteza – stop tytanu Ti6Al7Nb Protasul® 100, $E = 115 \text{ GPa}$, $\nu = 0,3$;
- panewka – ceramika Al_2O_3 Biolux Al_2O_3 -Keramik $E = 410 \text{ GPa}$, $\nu = 0,21-0,27$.

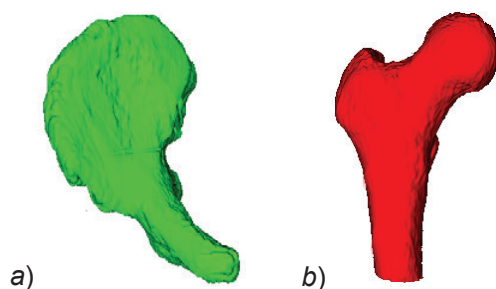
Na endoprotezę nałożono przestrzenne obciążenie statyczne 240 N, odpowiadające wartości w fazie styku pięty z podłożem w trakcie chodu normalnego (4,05 km/h) dla



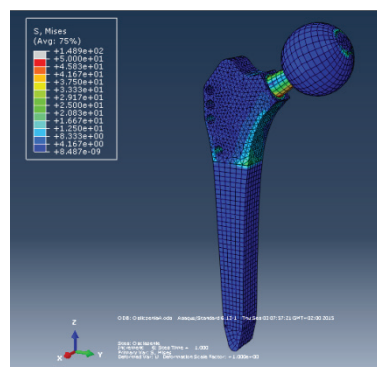
Rys. 1. Ogólny model obciążeń [1]



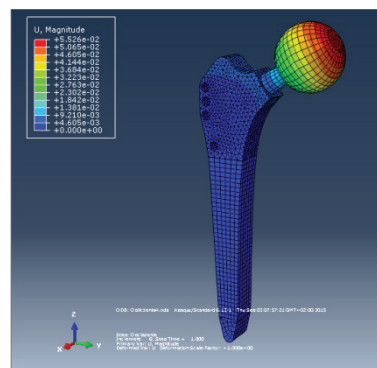
Rys. 2. Badania CT kręgosłupa wraz z segmentacją stawu biodrowego



Rys. 3. Model przestrzenny kości miedniczej (a) oraz kości udowej (b) uzyskany na podstawie zdjęć CT



Rys. 4. Rozkład naprężeń zredukowanych endoprotezy



Rys. 5. Rozkład przemieszczeń wypadkowych

pacjenta o masie 85 kg ($F = 850 \text{ N}$). Wyniki analiz numerycznych przedstawiono na rys. 4 i 5.

Podsumowanie

Wyniki badań numerycznych (rys. 4 i 5) pokazują, że maksymalne naprężenia występują w szyjce trzpienia endoprotezy – wyniosły one 149 MPa. W pozostałych częściach endoprotezy wartości naprężeń wahały się od 5 do 30 MPa. Naprężenia główne wynosiły 32, 92 i 5 MPa odpowiednio dla kierunków S11, S22 i S12. Najwyższe wartości przemieszczeń (na sklepieniu głowy) wyniosły 0,05 mm.

Z wyników analizy numerycznej można wywnioskować, że naprężenia te są odpowiednio niskie i zapewniają długą żywotność implantu w organizmie pacjenta. Wprowadzenie do organizmu endoprotezy zmienia biomechanikę układu oraz wytrzymałość na przenoszone obciążenia. Przy doborze protezy trzeba zadbać, żeby jak najdokładniej odpowiadała strukturze anatomicznej. Analiza numeryczna z wykorzystaniem MES umożliwia wyznaczenie oraz rozkład naprężeń zredukowanych w endoprotezie, a także przemieszczeń wypadkowych. Pozwala to na oszacowanie, jak implant będzie się zachowywał w strukturze kostnej. Można wpływać na optymalny dobór endoprotezy poprzez wybranie odpowiedniego kształtu i geometrii trzpienia, dobranie par materiałów oraz ich właściwości wytrzymałościowych.

LITERATURA

1. Będziański R. „Biomechanika inżynierska Zagadnienia wybrane”. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1997.
2. Reicher M. *Anatomia człowieka*. T. I: „Anatomia ogólna, kości, stawy i więzadła, mięśnie”, wyd. XIII. Warszawa: Wydawnictwo PZWL, 2016.
3. Bernakiewicz M. „Koncepcja rozwiązania konstrukcyjnego trzpienia endoprotezy bezcementowej stawu biodrowego”. *Biomechanika* 94. Prace Naukowe Instytut. Konstr. i Ekspl. Politechniki Wrocławskiej. Nr 75. Seria: Konferencja. Nr 21, Wrocław 1994.
4. Nam J., Choi H., Kang J. “Finite element analysis for friction noise of simplified hip-joint and its experimental validation”. *J. of. Mechanical Science and Technology*. 30, 8 (sierpień 2016): s. 3453–2460. ■