

Politechnika Poznańska  
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania  
Inżynieria Biomedyczna  
Budowa i Eksploatacja Urządzeń Biomedycznych  
2015/2016

PROJEKT MODELOWANIE I SYMULACJA ZAGADNIENÍ BIOMEDYCZNYCH

# **SYMULACJA PRZEPŁYWU CIEPŁA W ENDOPROTEZIE STAWU BIODROWEGO WYWOŁANEGO TARCIEM W CEMENCIE KOSTNYM**

Małgorzata Popiel  
Magdalena Nortinow

Prowadzący: dr hab. Tomasz Stręk, prof. nadzw.

## SPIS TREŚCI

1. Cel projektu.....	3
2. Wstęp	
2.1. Budowa stawu biodrowego.....	3
2.2. Najczęstsze schorzenia stawu biodrowego.....	4
2.3. Mechanika stawu biodrowego.....	5
2.4. Budowa endoprotezy stawu biodrowego.....	6
2.5. Właściwości wytrzymałościowe Ti-6Al-4V.....	8
2.6. Analiza przepływu ciepła.....	8
2.7. Metoda elementów skończonych.....	10
3. Opis problemu.....	11
4. Model endoprotezy stawu biodrowego.....	11
5. Równanie i warunki brzegowe.....	12
6. Metoda elementów skończonych.....	13
7. Analiza i symulacja.....	14
8. Wnioski.....	16
9. Bibliografia.....	17

## 1. CEL PROJEKTU

Celem projektu jest symulacja przepływu ciepła w endoprotezie stawu biodrowego wywołanego tarcieniem w cemencie kostnym. Do zrealizowania projektu wykorzystany został program COMSOL Multiphysics.

## 2. WSTĘP

### 2.1. BUDOWA STAWU BIODROWEGO

Kończyny dolne utrzymują ciało człowieka w pozycji pionowej, a ponadto są podstawowym narzędziem lokomocji. Kończynę dolną dzieli się na: obręcz biodrową, udo, podudzie i stopę. Staw biodrowy (*łac. articulatio coxae*), wchodzący w skład obręczy biodrowej, jest jednym z dwóch najważniejszych stawów układu ruchu, na którym spoczywa ciężar ciała zarówno w czasie odpoczynku jak i podczas ruchu. Jest to jeden z największych stawów organizmu człowieka. [1,2]

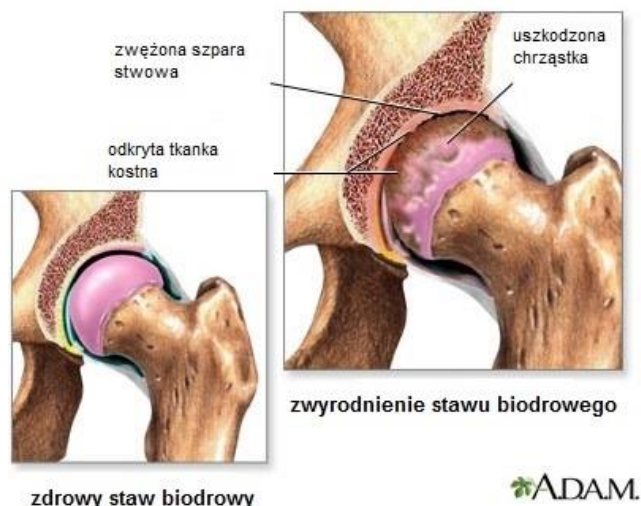
Staw ten łączy ze sobą kość udową oraz miednicę i jest to staw kulisty panewkowy. Zbudowany jest z dwóch powierzchni: głowy kości udowej (*łac. caput femoris*) oraz panewki stawu biodrowego (*łac. acetabulum*). Obie powierzchnie pokryte są chrząstką szklistą, która jest bardzo śliska i umożliwia bezbolesne ruchy w stawie. Głowa kości udowej nie jest całkowicie zakryta przez panewkę. Powierzchnia stawowa panewki ma kształt półksiężycowaty (*łac. facies lunata*) i pokryty jest chrząstką stawową. Dół panewki (*łac. fossa acetabuli*) wypełniony jest tkanką tłuszczową, a ponadto pogłębiona jest dodatkowo obrębką panewkowym (*łac. labrum acetabulare*). Do dołu panewki przymocowane jest więzadło głowy kości udowej (*łac. ligamentum capitis femoris*), które również łączy się w niewielkim wgłębieniu głowy kości udowej, zwanym dołkiem kości udowej (*łac. fovea capitis femoris*). Zadaniem więzadła kości udowe jest utrzymanie głowy kości udowej w panewce i zawężenie rotacji uda na zewnątrz. Ponadto zaopatruje głowę kości udowej w naczynia krwionośne. Unaczyniona jest ona przez trzy tętnice. Więzadło kości udowej składa się ono z trzech pasm: pasmo kulszowe tylnie - najdłuższe, pasmo łonowe przednie - wchodzące do wcięcia panewki, pasmo pośrednie – najcieńsze i nie wpływa na mechanikę stawu. Głowę kości udowej w panewce pomaga również utrzymać warstwa okrężna, czyli warstwa włókien, która oplata ją dookoła. Cały staw otoczony jest przez torebkę stawową (*łac. capsula articularis*) jest ona gruba i bardzo mocna, a dodatkowo wzmacniają ją trzy silnymi więzadłami. Ich zadaniem jest hamowanie ruchów kończyn dzięki czemu odciążają w dużym stopniu mięśnie. Więzadło biodrowo – udowe (*łac. lig. iliofemorale*) w kształcie wachlarza, jego pasmo górne ogranicza nadmierną rotację uda na zewnątrz i ruch uda do tyłu. Natomiast pasmo przednie ogranicza prostowanie oraz rotację do wewnątrz. Więzadło łonowo – udowe (*łac. lig. pubofemorale*) ogranicza odwodzenie uda. Oba te więzadła wzmacniają staw w przedniej części. Natomiast więzadło kulszowo - udowe (*łac. lig. ischiofemorale*) zabezpiecza tylną powierzchnię szyjki kości udowej. Jego zadaniem jest redukcja uda do wewnątrz. Torebka stawowa wraz z otaczającymi ją więzadłami może dźwigać, aż do 500kg. [1,2,3,4]



Rys. 1 Budowa stawu biodrowego [3]

## 2.2. NAJCZĘSTSZE SCHORZENIA STAWU BIODROWEGO

- **KOKSTARTOZA** , czyli zwyrodnienie stawu biodrowego. Jest to stopniowe niszczenie tkanek tworzących staw biodrowy. Podczas tego schorzenia dochodzi do uszkodzenia chrząstki stawowej, przez co straci ona swoje właściwości amortyzujące. Tworzą się wyrośla kostne zwane osteofitami, pojawiają się stwardnienia warstwy podchrzęstnej oraz powstają torbiele podchrzęstne. Powoduje to zwiększenie się tarcia pomiędzy powierzchniami stawu, a także ból, który jest odczuwany nie tylko podczas chodzenia, ale także podczas odpoczynku. Jest to schorzenie nieodwracalne, mocno ograniczający zdolność do lokomocji. Objawy pojawiają się z różną szybkością, jednakże choroba rozwija się zazwyczaj na przestrzeni lat.



Rys.2 Zwyrodnienie stawu biodrowego [5]

- **KONFIKKT PANEWKOWO -UDOWY**, występuje gdy głowa kości udowej jest niedopasowana do panewki. Można wyróżnić trzy typy tego schorzenia: pincer, cam oraz mixed. Nie leczone powoduje uszkodzenie chrząstki stawowej , a także obrzęk stawowego. Postęp choroby może spowodować całkowite zwyrodnienie stawu biodrowego. Pierwszym objawem jest ograniczenie w ruchomości stawu, a następnie pojawia się ból w trakcie lub po wykonaniu czynności fizycznej.
- **CHOROBA PERTHESA**, czyli jałowa martwica głowy kości udowej, jest to choroba dziecięca, dotykająca zazwyczaj chłopców pomiędzy 3 a 14 rokiem życia. Przyczyny choroby nie są znane, ale wczesne rozpoznanie i odpowiednie leczenie mogą prowadzić do całkowitego wyleczenia. Choroba charakteryzuje się czasowym obumarciem głowy i szyjki kości udowej. Podczas trzy lub czteroletniego czasu trwania choroby można wyróżnić cztery okresy:
  - I – wczesny, trwający około dwa miesiące,
  - II – martwicy, jego czas trwania to od sześciu do osiemnastu miesięcy,
  - III – regeneracji, trwający minimum sześć miesięcy, ale mogący trwać również ponad dwanaście miesięcy,
  - IV – ostatni okres – odbudowy i utrwalenia zmian.Charakterystyczne dla niej jest ograniczenie ruchomości, a także ból pojawiający się nie tylko w biodrze, ale także obejmujący kolano chorej kończyny. Dziecko utyka, a ponadto zanikają mu mięśnie pośladka i uda. Zignorowanie symptomów i nieprawidłowe leczenie może powodować wiele powikłań takich jak , np. ciężkie zniekształcenie stawu, skrócenie długości chorej kończyny, czy powtarzające się stany zapalne danego stawu biodrowego.
- **USZKODZENIE OBRĘBKA STAWOWEGO**, dotyka najczęściej sportowców, ale także osoby uprawiające sport rekreacyjnie. Obrąbek stawowy jest wewnątrzstawową strukturą chrząstki włóknistej stanowiącą przedłużenie panewki stawu biodrowego. Jego zadaniem

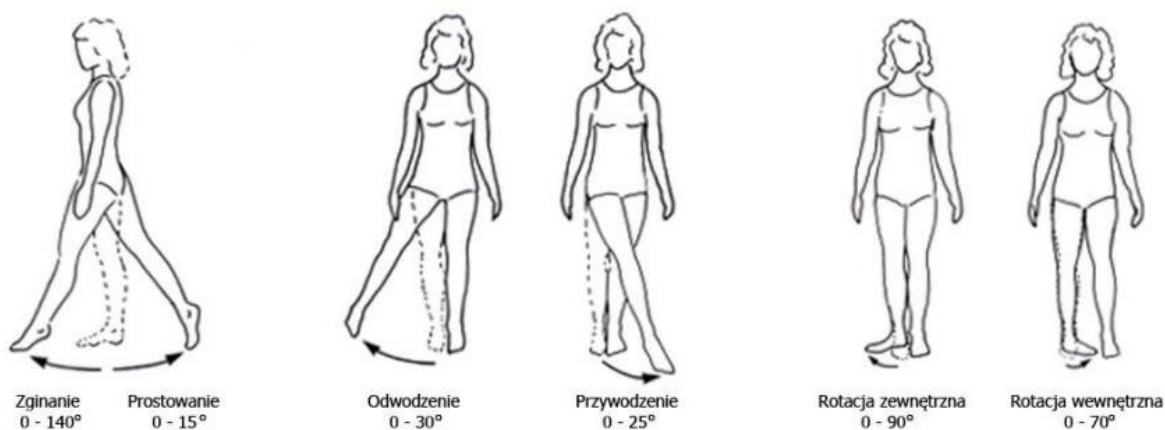
jest ochrona głowy kości udowej przed uderzeniem o kostny brzeg panewki oraz ułatwienie pełnych ruch w stawie. Jego uszkodzenie jest szczególnie bolesne, gdyż jest bardzo unaczyniony i unerwiony.

- BIODRO TRZASKAJĄCE lub inaczej biodro przeskakujące. Nazwa pochodzi od charakterystycznego dźwięku pojawiającego się w odpowiednich pozycjach. Podobnie jak w poprzednim schorzeniu szczególnie narażeni są na nie sportowcy, szczególnie ci, którzy narażeni są na duże obciążenia stawu biodrowego. Schorzenie spowodowane jest przesuwaniem napiętego pasma powięziowego nad krętarzem głowy kości udowej. Zazwyczaj powoduje ono dyskomfort, bez dolegliwości bólowych. [2, 6, 7]

### 2.3 MECHANIKA STAWU BIODROWEGO

Staw biodrowy jest jednym z najbardziej eksploatowanych stawów nośnych, a co za tym idzie najbardziej narażonych na zmiany przeciążeniowo-zwyrodnieniowe. Stanowi podstawę przenoszenia obciążeń całego ciała a ponadto jest najbardziej ruchomym stawem kończyny dolnej. Charakteryzuje się rozległym zakresem ruchów. Jest to staw wieloosiowy i odbywają się w nim ruchy w trzech płaszczyznach:

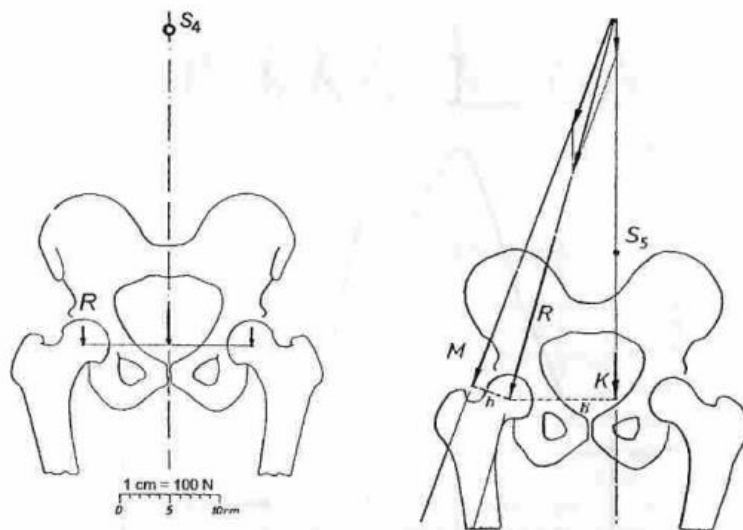
- w płaszczyźnie czołowej – zgięcie oraz wyprost ( $10^{\circ}$ -  $0^{\circ}$  –  $130^{\circ}$ )
- w płaszczyźnie strzałkowej – odwodzenie oraz przywiedzenie ( $40^{\circ}$  –  $0^{\circ}$  –  $30^{\circ}$ )
- w osi pionowej – obrót na zewnątrz i do wewnątrz ( $50^{\circ}$ -  $0^{\circ}$ - $400^{\circ}$ ) . [8,9]



Rys.3 Ruchy w stawie biodrowym [14]

Siły działające na staw biodrowy można podzielić na wewnętrzne (siły mięśni) i zewnętrzne (siły przyciągania ziemskiego, oddziaływanie podporowe, siły z jakimi działają na nie inne ciała). Staw biodrowy przenosi obciążenia dynamiczne i statyczne. Składają się na nie: masa ciała, siły mięśni oraz przyciąganie ziemskie. Staw ten przenosi obciążenia z kręgosłupa lędźwiowego przez miednicę do kończyn dolnych w warunkach ruchu złożonego. Obciążenie zmienia się w zależności od fazy chodu człowieka. Ponadto zmianie ulegają kąty i kierunek wektorów siły mięśni. Jak w każdym przegubie kulistym występuje w nim tarcie co powoduje jego zużycie. [8, 14]

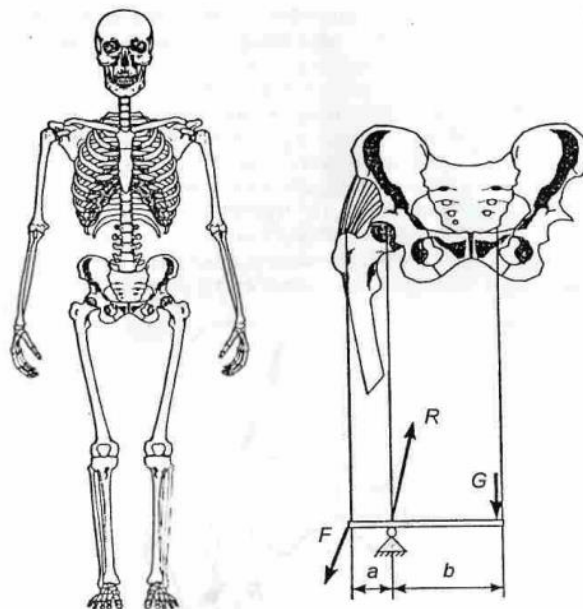
Z powodu na oddziaływanie wielu mięśni na staw biodrowy przedstawienie dokładnego schematu sił i momentów działających w tym stawie niestety nie jest możliwe. Jednakże istnieje wiele schematów obciążeń stawu biodrowego. Najbardziej popularnym i najczęściej stosowanym jest model Pauwelsa. Rozpatruje on dwa obciążenia : w fazie stania na obydwu nogach oraz podczas stania na jednej nodze. Gdy stoimy na dwóch kończynach środek ciężkości  $S_4$  (rys. 4) obciążenia od głowy, tułowia i kończyn górnych wynosi aż 62% masa ciała. Podczas stania na jednej kończynie do obciążeń przenoszonych przez staw dodane jest jeszcze obciążenie drugiej kończyny i wynosi 81% masy ciała. W tym przypadku środek ciężkości znajduje się w punkcie  $S_5$ . (rys. 4) [8]



Rys. 4 od lewej: obciążenie stawu biodrowego podczas stania na obu kończynach, po prawej: obciążenia stawu biodrowego podczas stania na jednej kończynie.

$R$  – siła działająca na główkę kości udowej  
 $K$  – wypadkowa sił oddziaływania masy ciała  
 $M$  – oddziaływanie mięśni odwodzących [8]

Przyjmuje się, że w fazie jednostronnego obciążenia kończyny całkowita wartość siły obciążająca staw biodrowy wynika z oddziaływania masy ciała oraz siły, z którą mięśnie działają na staw. Dzięki temu można stosować model dwuramiennej dźwigni, w której podparcie jest w anatomicznym środku ciężkości stawu (rys. 5). Jednakże takie uproszczenie ma uzasadnienie jedynie dla stanów równowagi, gdy środek ciężkości ciała znajduje się w płaszczyźnie czołowej. [8]



Rys. 5 Model dwuramiennej dźwigni będącej uproszczonym schematem obciążeń występujących w stawie biodrowym podczas stania na jednej kończynie.

Siła  $R$  jest przyłożona do dźwigni pod kątem  $16^\circ$  i jest to wypadkowa zredukowanego ciężaru ciała oraz siły mięśni odwodzących w stawie biodrowym. W modelu uwzględnione zostało oddziaływanie pasma biodrowo – piszczelowego. Ramię masy przebiega od dźwigni do punktu  $G$ . Punkt  $G$  jest rzutem środka ciężkości na linię poziomą biegnącą przez punkt obrotu  $O$ . [8]

## 2.4. BUDOWA ENDOPROTEZY STAWU BIODROWEGO

Endoprotezoplastyka stawu biodrowego jest operacja, która polega na zastąpieniu uszkodzonego stawu biodrowego sztuczną protezą. [10]

Endoprotezy stawu biodrowego możemy podzielić na 3 różne podgrupy:

- złożoność konstrukcji:
  - Całościowa
  - Częściowa
  
- obecność kołnierza:
  - Z kołnierzem
  - Bez kołnierza
  
- sposób mocowania:
  - Bezcementowe
  - Cementowe
  - Hybrydowe [11]



Rys.6 Element endoprotezy bezcementowej [10]

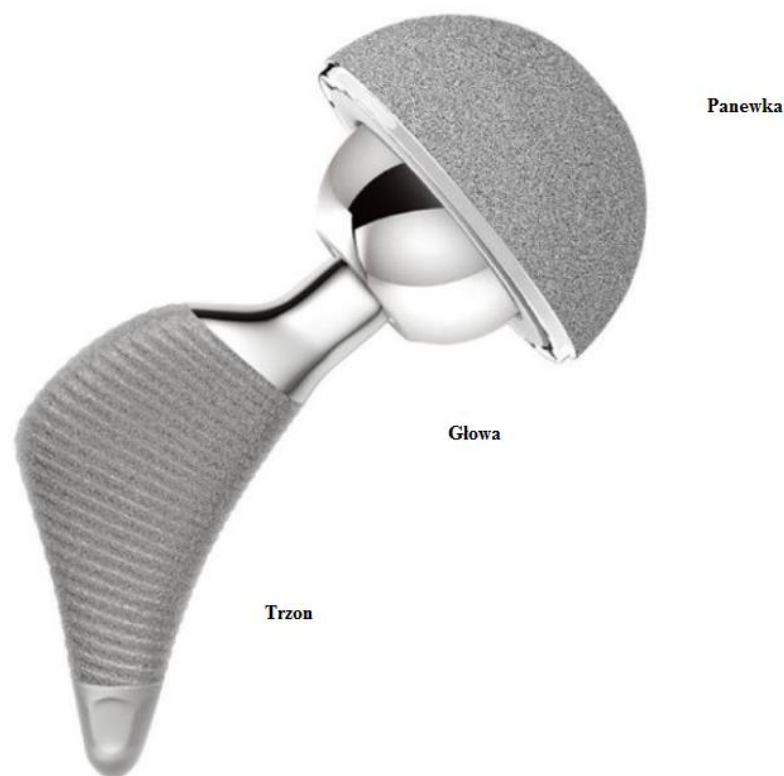


Rys. 7 Element endoprotezy cementowej [10]

Endoproteza stawu biodrowego zbudowana jest z trzech podstawowych elementów:

- trzpienia,
- główki,
- panewki z wkładką.

Trzeźnię wraz z główką ma za zadanie zastąpić bliższą część kości udowej. Metalowa panewka zaś jest wszczepiana od strony biodra. W naszym przypadku wszystkie elementy są zbudowane z dwufazowego stopu tytanu: Ti-6AL-4V. [10]



Rys. 8 Budowa endoprotezy stawu biodrowego [12]

## 2.5. WŁAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWE Ti-6Al-4V

Dwustopniowy stop tytanu Ti-6Al-4V wykazuje się wysoką granicą plastyczności, bo aż  $R_e = 900$  [MPa], wytrzymałości na rozciąganie  $R_m = 960-970$  [MPa] oraz wytrzymałości zmęczeniową dla 107 cykli  $R_z = 620 - 725$  [MPa], a moduł sprężystości  $E = 110-114$  [GPa]. Ponadto jedna z największych zalet tego stopu jest odporność na korozję oraz odpornością cieplną, jak również dobra obrabialność przez skrawanie. Ze względu na ich biokompatybilność stosowane są do produkcji implantów i endoprotez, m.in. do endoprotezy stawu biodrowego.

Tab. 1 Skład chemiczny stopu tytanu Ti-6Al-4V według normy ISO 5832/3 [13]

Stężenie pierwiastków % masowych							
O	V	Al	Fe	H	C	N	Ti
<0,2	3,5	5,5	<0,3	<0,0015	<0,08	<0,05	reszta

Skład chemiczny wpływa na właściwości stopu. Wanad może wywoływać reakcje cytologiczne, a aluminium może spowodować rozmięknienie kości lub uszkodzenie nerwów.

## 2.6 ANALIZA PRZEPLYWU CIEPŁA

Przeptyw ciepła zdefiniowany jako ruch energii ze względu na różnice temperatur. Przebiega on zawsze z ciała o temperaturze wyższej do ciała o niższej temperaturze będącymi w ścisłym kontakcie ze sobą. Proces prowadzi do wyrównania obu temperatur i zachodzi zgodnie z II zasadą termodynamiki.

Wyróżniamy trzy mechanizmy charakteryzujące to zjawisko.

- Przewodzenie

Jest to proces, w którym makroskopowe części ośrodka nie przemieszczają się względem siebie. W różnych nośnikach zachodzi za pomocą różnych mechanizmów. W gazach zachodzi przez



zderzenie molekuł, w cieczech dzięki drganiom cząsteczek uwięzionych przez inne cząsteczki, będące w ich bliskim sąsiedztwie. Natomiast w metalach ciepło przenoszone jest przez elektrony, a w innych ciałach stałych przez fotony. W gazach i w cieczech przewodzenie ciepła zachodzi w określonych warunkach, natomiast jest to jedyny mechanizm dla ciał stałych.

Przewodzenie ciepła jest proporcjonalne do gradientu temperatur. Zależność została opisana przez Fouriera. Jako wektor zwrócony jest przeciwnie do wektora gradientu.

- Konwekcja

Występuje zarówno w cieczech jak i gazach. Dzięki przemieszczaniu się cząsteczek przemieszcza się ich energia cieplna. Rozróżniamy konwekcję swobodną, w której ruch cieczy wywołany jest siłami wyporu, oraz konwekcję wymuszoną w której wewnętrzne ruchy płynu wywołane są przez ogólny przepływ płynu. Czasami przez pojęcie konwekcja rozumie się ruch materii związany z różnicą temperatur.

- Promieniowanie

Zjawisko następuje dzięki przenoszeniu energii cieplnej przez fale elektromagnetyczne określonych długości. Jednakże głównie zachodzi dla fal podczerwonych. Występuje między powierzchniami ciał stałych i cieczy poprzez ciała gazowe i próżnię.

Relacja gęstości i prędkości:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0$$

Do opisu przepływu ciepła można użyć prawa Fourier'a dla przewodzenia ciepła, które wskazuje, że strumień ciepła przewodzącego  $q$ , jest proporcjonalny do pochodnej temperatury  $T$ .

$$q_i = -k \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

Gdzie  $k$  to przewodność cieplna  $k$  można przedstawić w postaci wyznacznika:

$$k = \begin{vmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{vmatrix}$$

A strumień ciepła przewodzącego można zapisać w postaci:

$$q_i = - \sum_j k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

### Równanie przewodnictwa cieplnego

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + (u \cdot \nabla) T \right) = -(\nabla \cdot q) + \tau : S - \frac{T \partial \rho}{\rho \partial T} / p \left( \frac{\partial p}{\partial t} + (u \cdot \nabla) p \right) + Q$$

Gdzie

- $\rho$  – gęstość [kg/m<sup>3</sup>]
- $C_p$  – pojemność cieplna w stałym ciśnieniu [J/(kg·K)]

- T – temperatura absolutna [K]
- u – wektor prędkości [m/s]
- q – strumień ciepła przewodzenia [W/m<sup>2</sup>]
- p – ciśnienie [Pa]
- τ – wyznacznik lepkości naprężeni [Pa]
- S – wyznacznik współczynnika napięcia [1/s]

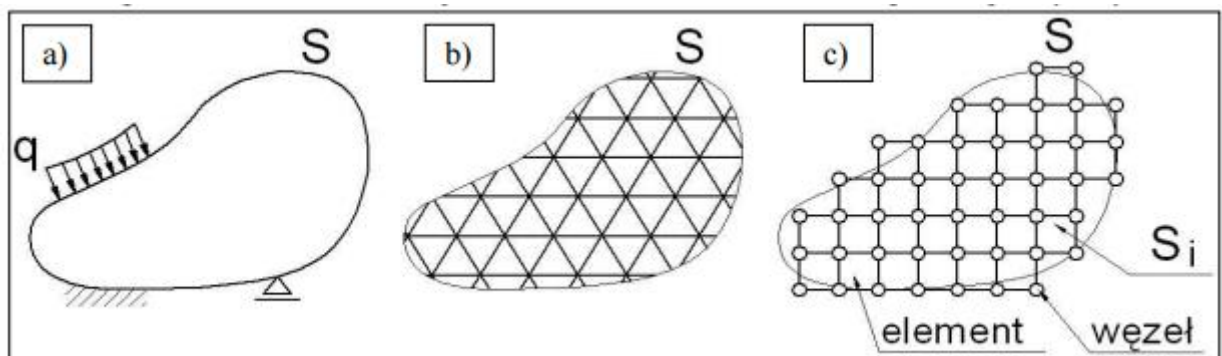
$$S = \frac{1}{2}(\nabla u + (\nabla u)^T)$$

- Q – zawiera źródło ciepła inne niż lepkiego ogrzewania [W/m<sup>3</sup>] [18,19]

## 2.7. METODA ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Metoda Elementów Skończonych, w skrócie MES, jest jedną z najbardziej popularnych metod rozwiązywania zaawansowanych obliczeń inżynierskich czy badań naukowych. Pozwala na przekształcenie równań różniczkowych na układ równań nieliniowych. Jej ideą jest dyskretyzacja modeli geometrycznych ciągłych, czyli mówiąc prościej podział na skończoną liczbę podobszarów, zwanych elementami skończonymi. Dlatego metoda wymaga modelowania nawet skomplikowanych i złożonych konstrukcji.

Elementy podzielonego modelu łączą się w tzw. węzłach i tworzą dyskretny model geometryczny przeznaczony do obliczeń. Podczas obliczeń należy jak najdokładniej odwzorować model, dlatego trzeba dokładnie dobrać zagęszczenie siatki. Faktyczne obliczenia przeprowadza się tylko dla węzłów siatki.



Rys. 9 Transformacja w siatkę elementów skończonych: a) model geometryczny ciągły, b) model dyskretny idealny, c) model geometryczny dyskretny obliczeniowy [20]

MES jest metodą aproksymacji, czyli otrzymywania przybliżonych rozwiązań, równań różniczkowych cząstkowych, które stanowią model matematyczny procesu lub układu fizycznego. Dany proces lub stan określany jest przy użyciu parametrów będących funkcjami położenia w czasie i przestrzeni.

Rozwiązanie konkretnego problemu za pomocą MES wiąże się ze skorzystaniem z odpowiedniego programu zawierającego potrzebny model. Przeprowadzenie obliczeń zachodzi w kilku krokach:

- wybranie odpowiedniego modelu,
- zdefiniowanie obszaru obliczeniowego i podział na elementy skończone,
- dany proces lub stan określany jest przy użyciu parametrów będących funkcjami położenia w czasie i przestrzeni,
- określenie parametrów,
- rozpoczęcie obliczeń.

Należy jednak pamiętać, że metoda nie jest pozbawiona wad i w końcowych wynikach należy uwzględnić możliwe błędy obliczeniowe. Mogą one powstać na skutek błędu modelowania, odwzorowania obszaru, wartości współczynników czy zaokrągleń. Dlatego po uzyskaniu wyników należy poddać je weryfikacji.

Metoda Elementów Skończonych jest jednak powszechnie używana w wielu dziedzinach. Jedną z jej zalet jest możliwość pominięcia budowania prototypów. Dzięki czemu optymalizują powstawanie produkcji i redukuje koszty. Pozwala na sprawdzanie wytrzymałości konstrukcji, można dzięki niej przeprowadzać symulacje odkształceń czy naprężeń. Ponadto umożliwia analizę przepływu ciepła. Umożliwia także sprawdzić

właściwości dynamiczne, statyczne oraz kinematyczne maszyn.

Jest metodą dzięki, której można szybko i w miarę dokładnie otrzymać potrzebne wyniki. [20,21]

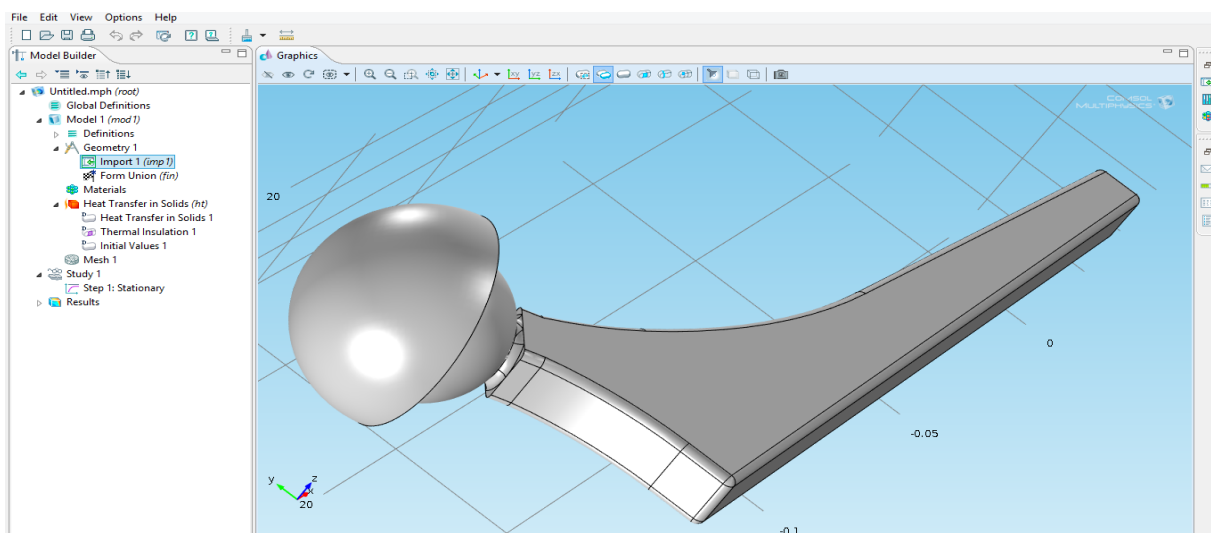
### 3. OPIS PROBLEMU

W stawie biodrowym występują wcześniej wspomniane siły tarcia, które zależy między innymi od powierzchni materiałów trących, obciążenia, warunków smarowania czy odprowadzenia ciepła. Niestety nie udało się odwzorować warunków trybologicznych w endoprotezie ( współczynnik tarcia w naturalnym stawie = 0,001 – 0,03, natomiast w endoprotezie = 0,05 – 0,06 w parze metal-tworzywo i 0,13 w parze metal – metal) [15] Pod ich wpływem nagrzewa się cement kostny z którego zbudowana jest głowa endoprotezy co może prowadzić do szybszego jej zużycia i niszczenia powierzchni, na które działają siły. Zużycie może powodować stany zapalne, a podwyższona temperatura (nawet do 100°C) uszkodzenie tkanek. Dlatego bardzo ważnym problemem jest zminimalizowanie sił tarcia i temperatury a co za tym idzie przeprowadzania symulacji i doświadczeń przedstawiających ich wpływ na endoprotezę i ich próby minimalizacji.

### 4. MODEL ENDOPROTEZY STAWU BIODROWEGO

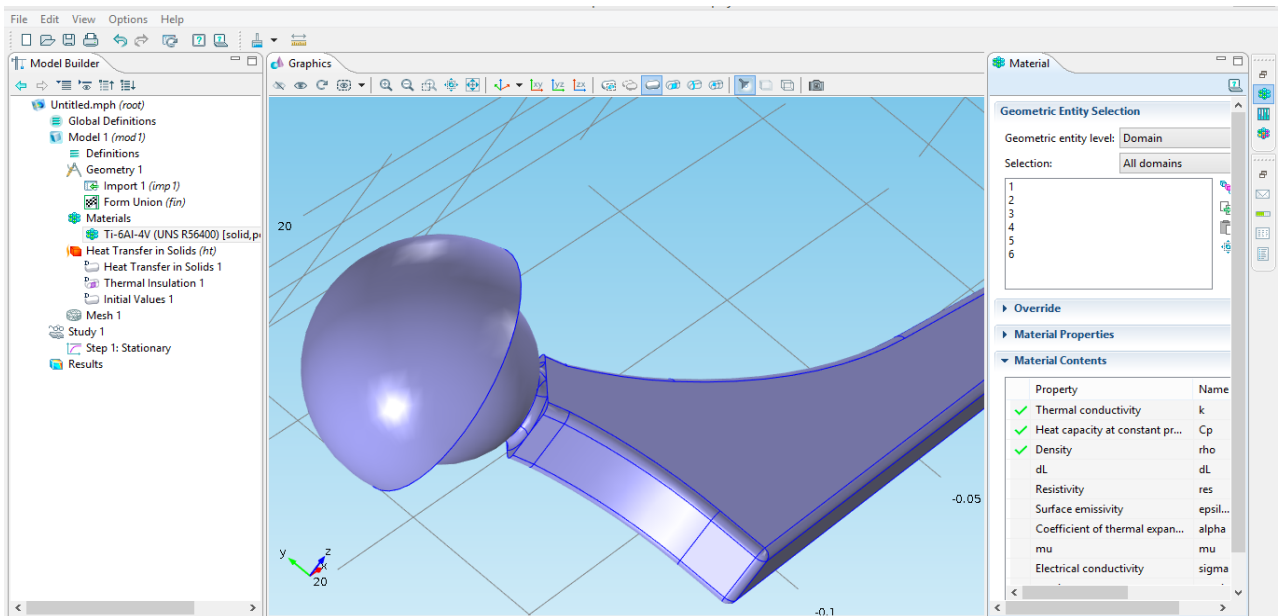
Do przeprowadzenia symulacji przepływu ciepła w endoprotezie stawu biodrowego powstającego przez siły tarcia wykorzystaliśmy model 3D. Model został pobrany ze strony internetowej grabcad.com (IGS – uniwersalny format programów CAD).

Pierwszym krokiem był import ściągniętego modelu do programu COMSOL Multiphysics 4.3. Model endoprotezy został wykonany dokładnie i prawidłowo, dlatego powierzchnie na który został on podzielony zgadzały się z wersją CAD-owską. W innym wypadku należało by skorzystać z opcji ręcznego podziału (podczas importu należy ustawić face partitioning jako manual i dobrać wartości wyświetlanych parametrów). Jednakże program nie posiada możliwości zmiany rozkładu obszarów i należy tego dokonać przed importem modelu. Ponieważ formaty modeli indeksujące wierzchołki, a co za tym idzie przechowujące informacje o podziale powierzchni (m.in. VRML, OBJ) nie są akceptowane przez program COMSOL, jedyną możliwością jest import pliku tekstowego utworzonego w środowisku MatLab z ręcznie wprowadzonymi współrzędnymi wierzchołków.



Rys. 10 Import modelu endoprotezy do programu COMSOL Mutiphysics

Kolejnym krokiem było ustawienie odpowiedniego materiału, z którego wykonana jest endoproteza. Wybraliśmy z biblioteki programu biomedyczny stop tytanu Ti-6Al-4V, czyli najpopularniejszy stop tytanu wykorzystywany w inżynierii biomedycznej. Jest to stop o strukturze dwufazowej  $\alpha+\beta$ . Jego właściwości pozwalają wytwarzać protezy o niezwyklej wytrzymałości i odporności na korozję oraz najniższej gęstości i module Younga ze wszystkich biomateriałów metalicznych. Istotną dla naszej symulacji zaletą jest też jego niska przewodność cieplna.

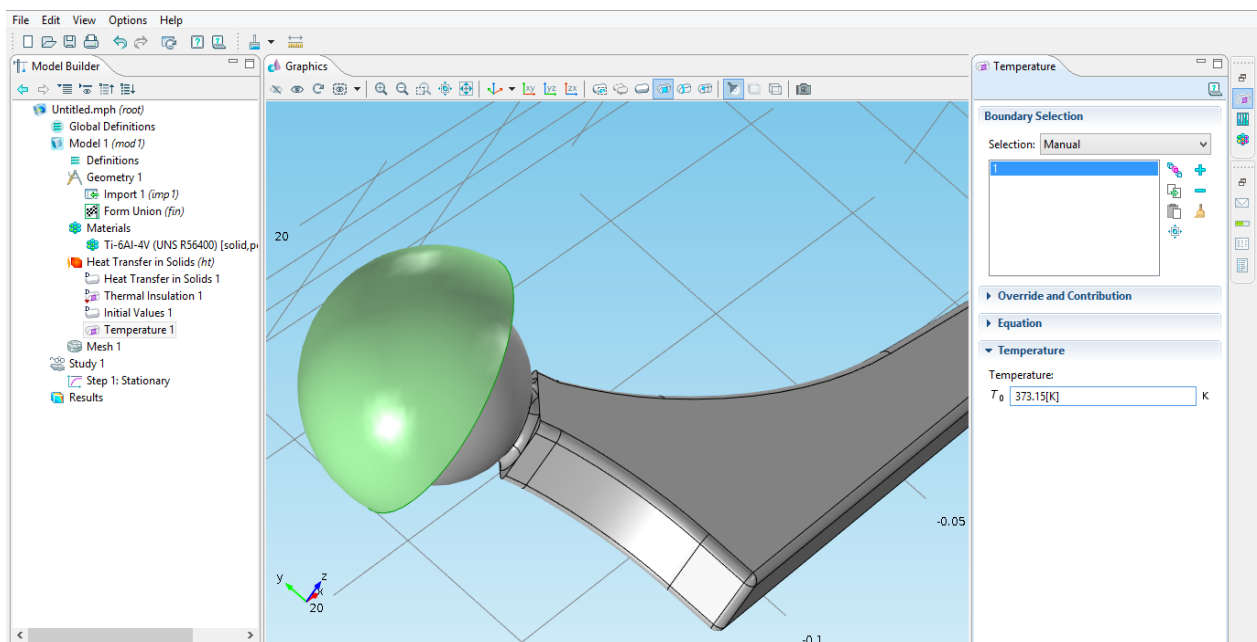


Rys. 11. Wybór materiału

## 5. RÓWNANIE I WARUNKI BRZEGOWE

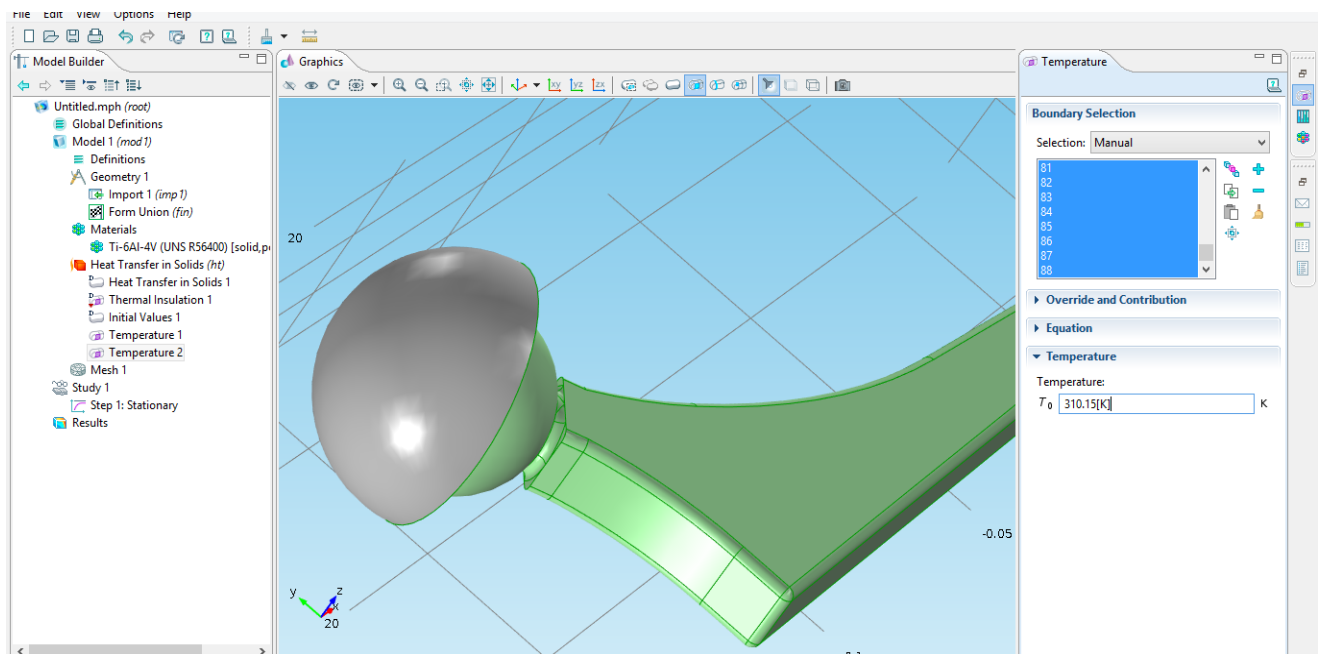
Po upewnieniu się, że wszystkie trzy własności materiału potrzebne do analizy, a więc gęstość, moduł Younga i współczynnik Poissona, są zdefiniowane przystąpiliśmy do ustawienia warunków brzegowych symulacji.

Rozpoczęliśmy od ustawienia temperatury głowy endoprotezy – 373,15K (100°C) – wartość z danych literaturowych.



Rys. 12 Warunek brzegowy temperatury, do której nagrzewa się cement kostny w wyniku tarcia (100 \*C) - dane z literatury [16]

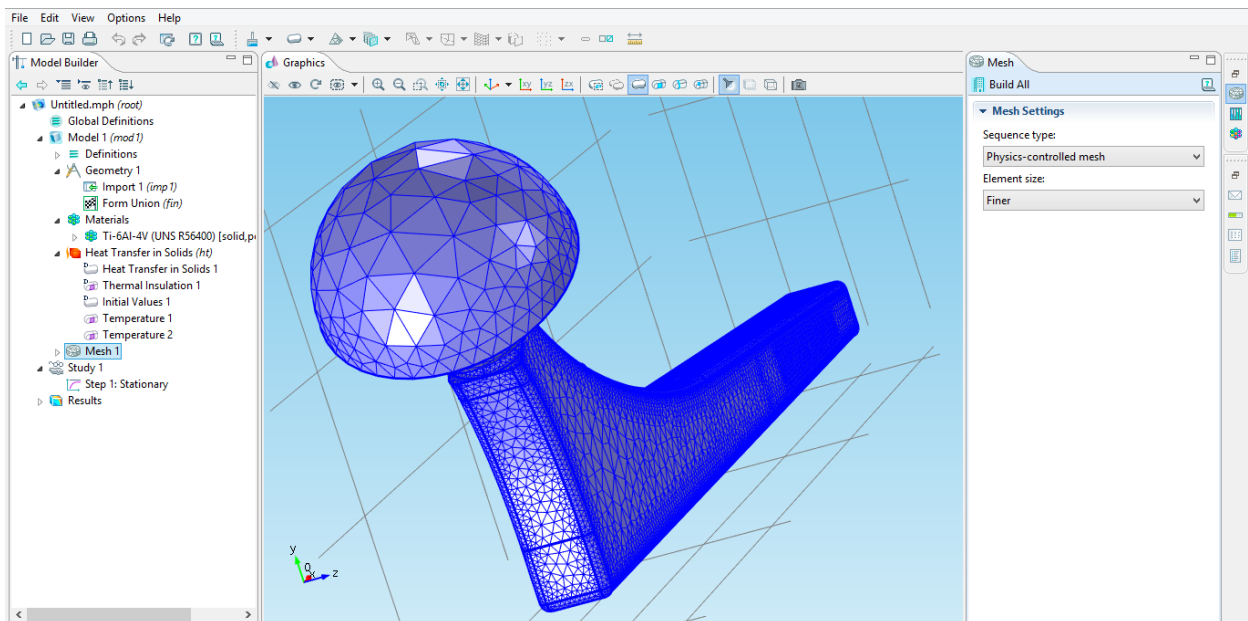
Następnie ustawiliśmy temperaturę pozostałej części implantu jako 310,15 K (37 °C), co odpowiada średniej temperaturze ciała.



Rys. 12 Warunek brzegowy temp. reszty endoprotezy (średnia temp. ciała: 37°C)

## 6. METODA ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

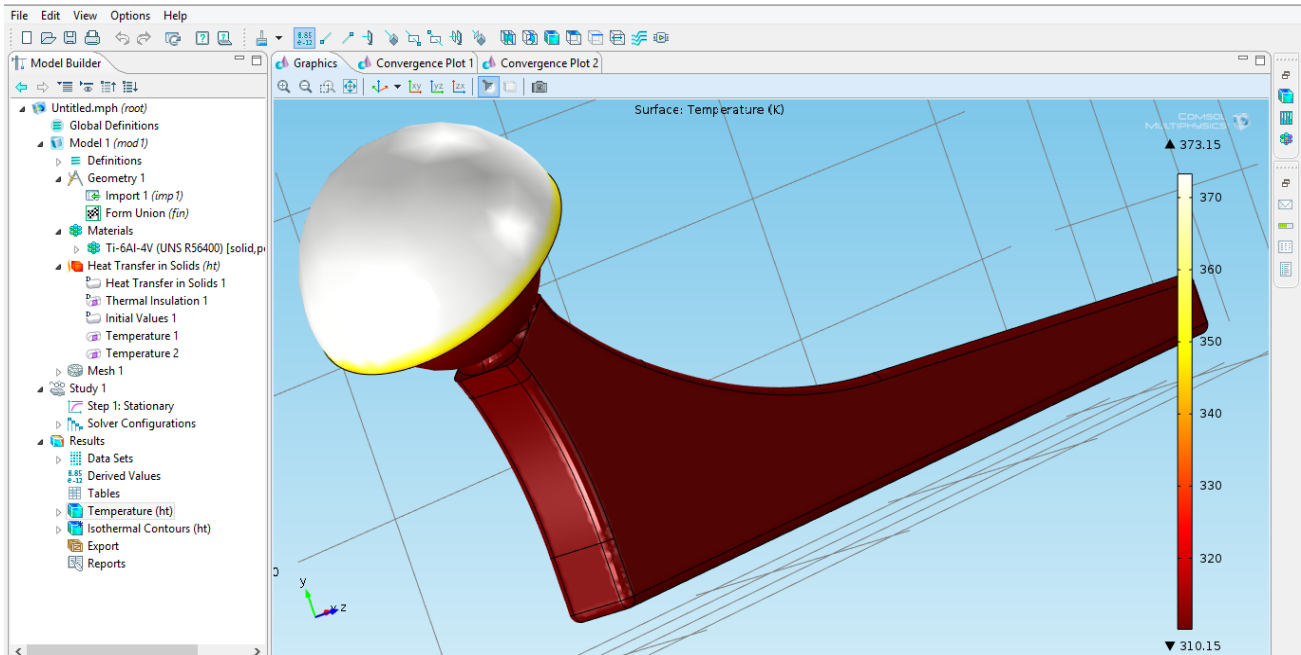
Ostatnim krokiem przed uruchomieniem symulacji jest nałożenie siatki elementów skończonych (typ triangular). Wybrałyśmy siatkę generowaną automatycznie (Physics-controlled mesh) o gęstości Finer.



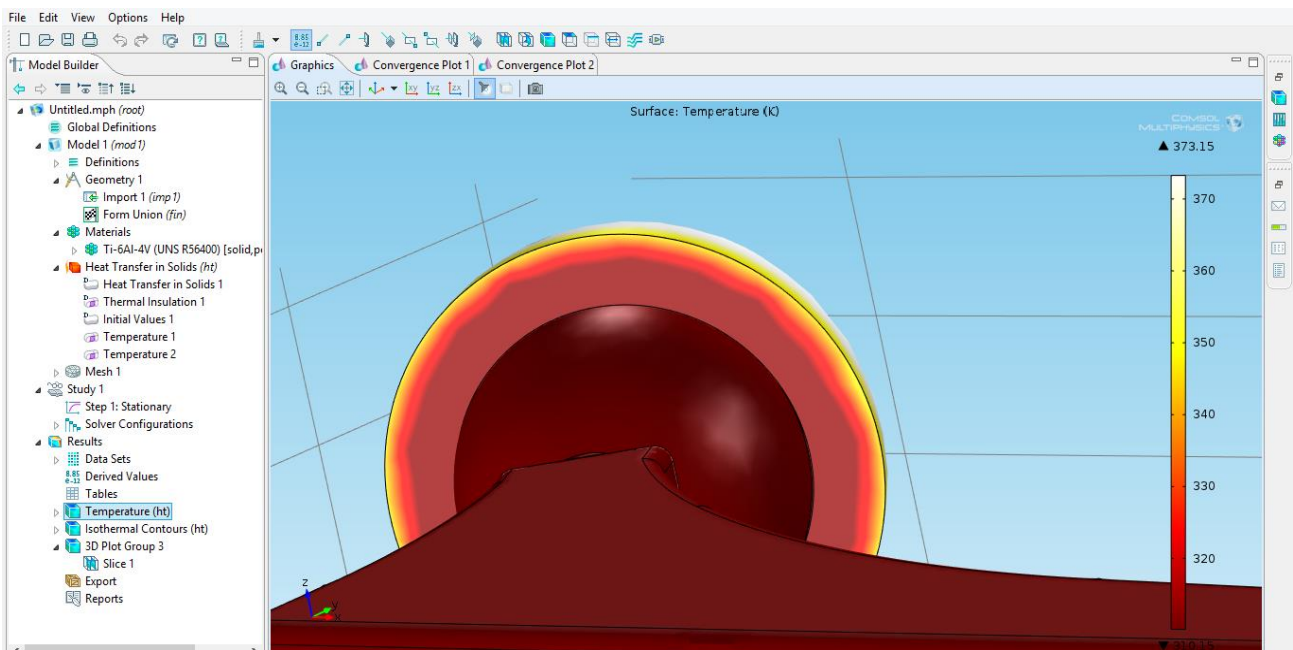
Rys. 13 Nałożona na model siatka elementów skończonych o gęstości „finer”.

## 7. ANALIZA I SYMULACJA

Z symulacji otrzymałyśmy następujące wyniki:

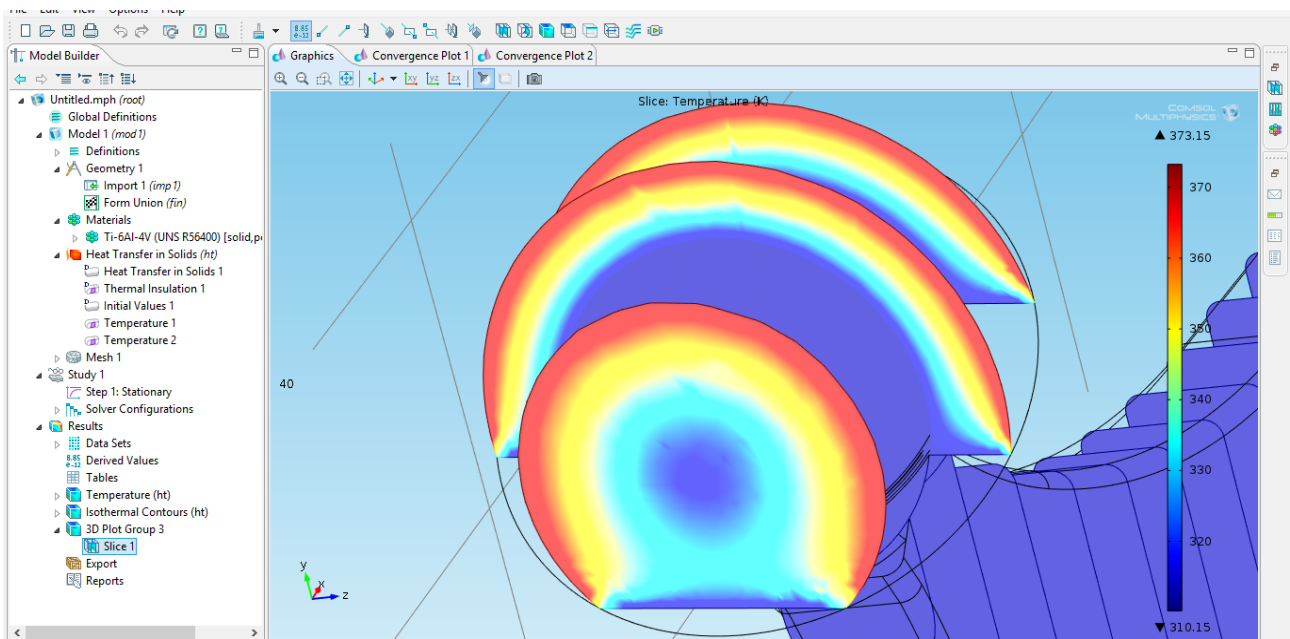


Rys. 14 Uzyskany rozkład powierzchniowy temperatury [K]

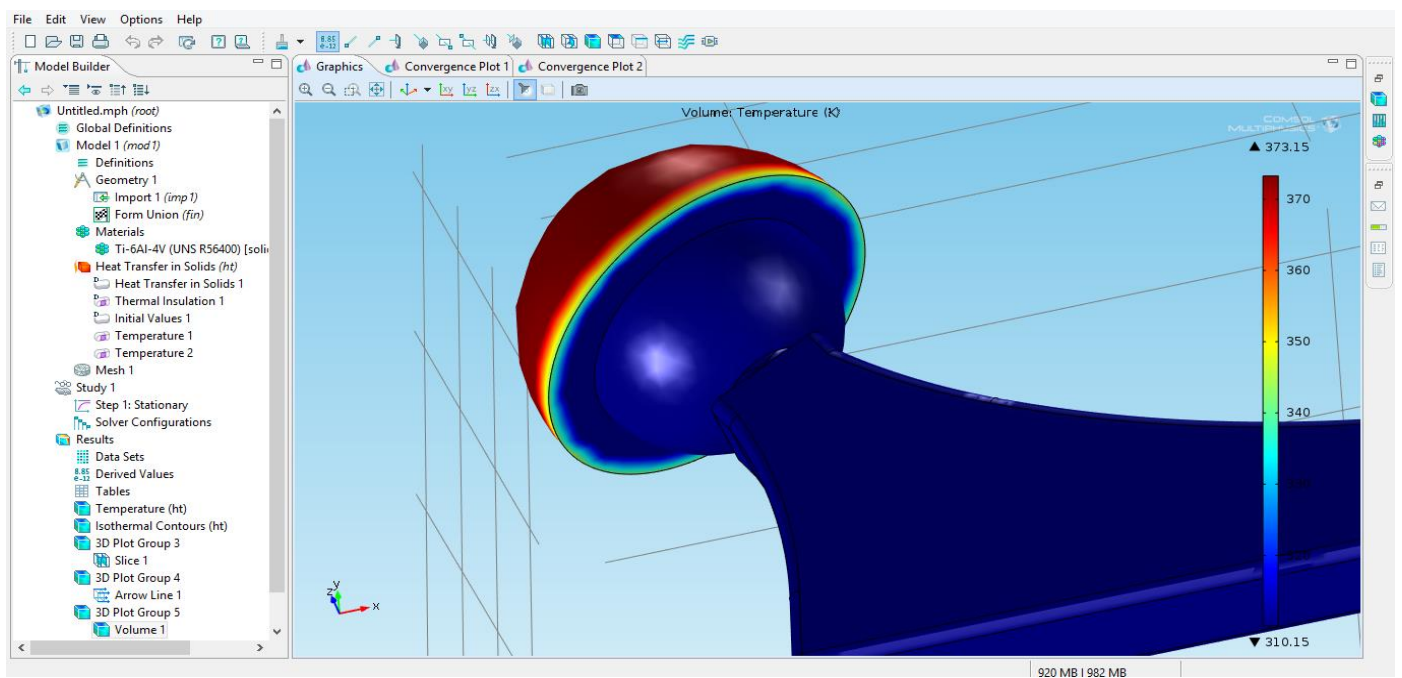


Rys. 15 Widok rozkładu powierzchniowego temperatury w dolnej części głowy endoprotezy

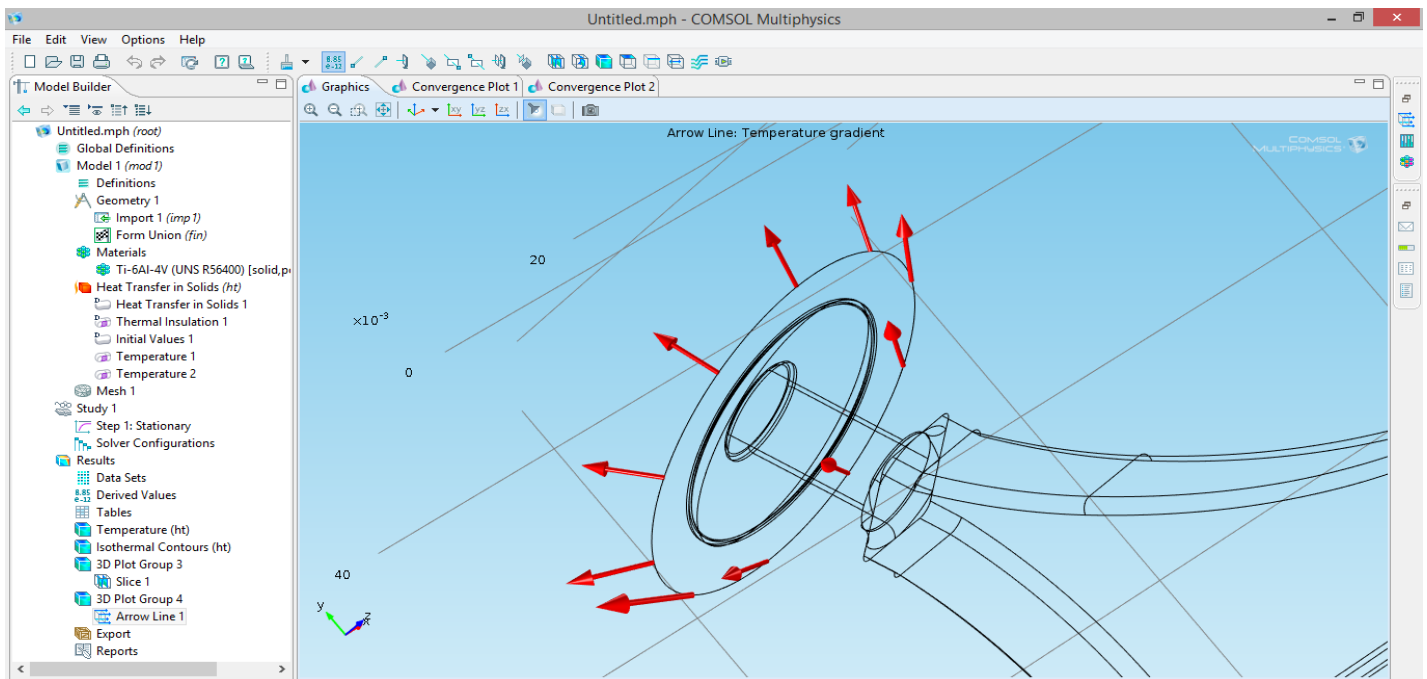




Rys. 16 Rozkład temp. wewnątrz endoprotezy przedstawiony za pomocą „slice’ów”



Rys. 17 Objęściowy wykres rozkładu temperatury w endoprotezie



Rys.18 Gradient temperatury przedstawiony za pomocą wykresu wektorowego

## 8. WNIOSKI

Sposób połączenia głowy endoprotezy z trzpieniem zapobiegł transferowi ciepła wytworzonego w cemencie kostnym na skutek tarcia o panewkę stawu biodrowego pomiędzy tymi dwiema częściami. Świadczy to o poprawności projektu badanego implantu. Ponadto ciepło pochodzące od rozgrzanego cementu kostnego nie dotarło do głębszych warstw głowy endoprotezy, a zostało zatrzymane w warstwach bliższych powierzchni zewnętrznej.



## 9. BIBLIOGRAFIA

- [1] [http://www.zostargowek.waw.pl/kwartalnik\\_strony/45/staw\\_biodrowy.pdf](http://www.zostargowek.waw.pl/kwartalnik_strony/45/staw_biodrowy.pdf)
- [2] <http://www.hyalutidin.pl/staw-biodrowy>
- [3] <http://fizjoplaner.pl/endoproteza-stawu-biodrowego.html>
- [4] <http://fizjo-plus.net/konflikt-udowo-panewkowy/>
- [5] <http://www.gabinet.waw.pl/zwyrodnienie-stawu-biodrowego/>
- [6] <http://www.ortopedika.pl/1021-konflikt-udowo---panewkowy>
- [7] <http://www.emedica.pl/choroby/opis/143-choroba-perthesa.html>
- [8] R. Będziński, *Biomechanika Inżynierska. Zagadnienia wybrane*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997, s. 126 - 130
- [9] <http://pg.gda.pl/info/mech/katedra/imis/wp-content/blogs.dir/49/files/2012/10/roz8.pdf>
- [10] *Endoproteza stawu biodrowego. Przewodnik dla pacjenta* Oddział Ortopedyczny, Wielospecjalistyczny w Szpital Milczu
- [11] Niedoskonali, *Projekt indywidualnej endoprotezy stawu biodrowego*
- [12] <http://www.sport-med.pl/leczenie/endoproteza-stawu-biodrowego>
- [13] J. Marciniak: *Biomateriały*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2002
- [14] P. Wojnarowski, *Wpływ wstępnego ustawienia endoprotezy stawu na zużycie wkładki polietylenowej*, maszynopis pracy doktorskiej, promotor: prof. dr hab. inż. J. Rońda, Kraków: Akademia Górniczo – Hutnicza im. S. Staszica, 2005, s. 13 – 16
- [15] [http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:yOnFcw4zW1oJ:zkup.mchtr.pw.edu.pl/pom\\_dyd/abi/endoprotezy.ppt+&cd=1&hl=pl&ct=clnk&gl=pl](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:yOnFcw4zW1oJ:zkup.mchtr.pw.edu.pl/pom_dyd/abi/endoprotezy.ppt+&cd=1&hl=pl&ct=clnk&gl=pl)
- [16] K. Kaorapapong, S. Amornsamankul, B. Wiwatanapataphee, *Heat Transfer in Cemented Hip Replacement Process*, I-M. Tang, , International Journal of Mechanics 3/2011
- [17]. M. Nałęcz, *Biomechanika i inżynieria rehabilitacyjna tom 5 Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna* 2000, Wydawnictwo EXIT, Warszawa 2004
- [18] W. Pudlik, *Wymiana i wymienniki ciepła*, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2012, dostępne w Internecie: <http://pbc.gda.pl/Content/4404/wymiana-i-wymienniki-final.pdf>
- [19] COMSOL Multiphysics 4.3 Users Guide, dostępny w internecie: <http://people.ee.ethz.ch/~fieldcom/pps-comsol/documents/User%20Guide/COMSOLMultiphysicsUsersGuide.pdf>
- [20] <http://www.knse.pl/publikacje/65.pdf>
- [21] K. Banaś, *Wprowadzenie do MES*, 2012, dostępne w internecie: [http://riad.pk.edu.pl/~kbanas/wprowadzenie\\_do\\_MES.pdf](http://riad.pk.edu.pl/~kbanas/wprowadzenie_do_MES.pdf)