OKREŚLENIE PARAMETRÓW MATERIAŁOWYCH KOŚCI BELECZKOWEJ NA PODSTAWIE SYMULACJI NA POZIOMIE MIKROSKOPOWYM

ANTONI JOHN, GRZEGORZ KOKOT, PRZEMYSŁAW MAKOWSKI

Katedra Wytrzymałości Materiałów i Metod Komputerowych Mechaniki e-mail: Antoni.John@polsl.p, Grzegorz.Kokot@polsl.pl, Przemyslaw.Makowski@polsl.pl

<u>Streszczenie.</u>W pracy podjęto próbę określenia parametrów materiałowych kości beleczkowej dla skali makroskopowej na podstawie symulacji w skali mikro. Pozyskaną próbkę tkanki gąbczastej zeskanowano z wykorzystaniem mikrotomografu komputerowego i poddano próbie ściskania, a następnie zasymulowano numerycznie. Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzono identyfikację modułu Younga materiału beleczek kostnych oraz obliczono makroskopowe parametry materiałowe kości beleczkowej.

1. WSTĘP

Określenie parametrów materiałowych tkanki gąbczastej jest zagadnieniem trudnym ze względu na problemy napotykane w trakcie prowadzenia badań doświadczalnych, a także różnice wynikające z cech osobniczych, miejsca pobrania próbki oraz sposobu jej przechowywania. Ze względu na niszczący charakter przeprowadzonej próby ściskania niemożliwe było określenie własności badanej próbki w kilku kierunkach. Powyższą niedogodność można pokonać, wykorzystując modele numeryczne zbudowane na bazie zdjęć mikrotomograficznych (ang. micro finite element analysis - µFEA [1]). Symulując przeprowadzoną próbę ściskania, dokonano identyfikacji modułu Younga materiału beleczek kostnych. Stosując zależności na wydłużenie (skrócenie) próbki, obliczono zastępczy makroskopowy moduł Younga kości beleczkowej. Ze względu na szeroki zakres wartości parametrów materiałowych materiału beleczek, odnotowany w literaturze, do obliczeń przyjęto również wybrane wartości z rozpatrywanego zakresu i zbadano ich wpływ na parametry makroskopowe tkanki gąbczastej.

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Z głowy kości udowej pobrano cylindryczną próbkę tkanki gąbczastej o średnicy 9 mm i długości 19 mm. Pozyskaną próbkę poddano próbie ściskania na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z050. Odkształcenia mierzono z wykorzystaniem wideoekstensometru Zwick Messphysik, co zapewniło wysoką dokładność pomiarów. Badanie prowadzono do momentu zniszczenia próbki. Na podstawie wykresu siła ściskająca – odkształcenie wyznaczonego przez oprogramowanie maszyny (rys.1), w zakresie odkształceń od 5 do 7% obliczono makroskopowy moduł Younga tkanki gąbczastej (tab.1).



Malaana ala asta		M. J. J. X.
	Tabela 1.	Wyniki próby ściskani

Maksymalna siła	Odkształcenie	Moduł Younga
ściskająca [N]	[%]	[MPa]
280	7,4	89,64

3. BUDOWA MODELU NUMERYCZNEGO NA BAZIE ZDJĘĆ MIKROTOMOGRAFICZNYCH

Alternatywą dla badań doświadczalnych są analizy µFE umożliwiające uwzględnienie wysoka beleczkowej dokładnością. mikrostruktury kości Z Na bazie zdjeć mikrotomograficznych generowany jest trójwymiarowy model struktury kości zbudowanyz vokseli. Ze wzgledu na wysoka rozdzielczość skanowania rzedu mikrometrów możliwe jest bardzo dokładne odwzorowanie geometrii mikrostruktury mającej wyraźny wpływ na własności mechaniczne kości beleczkowej. Mając na uwadze skomplikowaną i niejednorodną budowę rozpatrywanej tkanki oraz dostępność komercyjnych programów narzędziowych, najczęściej stosuje się metodę obliczeniową - MES. Model geometryczny podzielono na czworościenne elementy skończone z wykorzystaniem oprogramowania Mimics i MSC.Software. Dla wygenerowanego modelu numerycznego możliwe jest tak przeprowadzenie symulacji próby ściskania, rozciągania, a także innych badań doświadczalnych trudnych do przeprowadzenia w praktyce. Stosując powyższą metodologię, na bazie zdjęć µCT wykonanych przed próbą ściskania, wygenerowano model numeryczny walcowej próbki tkanki gąbczastej (rys.2).



Rys.2. Struktura próbki cylindrycznej

3.1. Modyfikacja geometrii modelu numerycznego

Początkową geometrię modelu próbki poddano modyfikacjom, w wyniku których otrzymano model numeryczny o nowej geometrii ograniczonej szcześcianemo długości krawędzi równej 3,5 mm (rys.3). Zmodyfikowany model wykorzystano w dalszych obliczeniach, mając na uwadze kierunkowe własności kości beleczkowej. Następnie zagęszczono i wygładzono siatkę elementów skończonych, otrzymując model numeryczny charakteryzujący się średnią wielkością krawędzi elementu równą 60 µm. Przyjęto liniowo sprężysty, izotropowy model materiału beleczek kostnych.



Rys.3. Model numeryczny o nowej geometrii

3.2. Symulacja próby ściskania

W następnym kroku symulowano numerycznie przeprowadzoną doświadczalnie próbę ściskania dla zmodyfikowanej geometrii modelu próbki tkanki kostnej. Ze względu na zmianę pola powierzchni przekroju poprzecznego rozpatrywanej próbki konieczne było przeskalowanie wartości maksymalnej siły ściskającej uzyskanej w eksperymencie. Obliczona wartość siły ściskającej wynosiła 53,94 N. Próbkę ściskano dwiema sztywnymi, równoległymi płaszczyznami symulującymi elementy robocze maszyny. Siłę ściskającą przyłożono do węzła sterującego górnej płaszczyzny, natomiast płaszczyznę dolną utwierdzono, nadając jej zerowe przemieszczenia (rys. 4).



Rys.4. Symulacja próby ściskania (kierunek z)

4. OBLICZENIA

Na bazie wyników przeprowadzonych symulacji numerycznych zidentyfikowano moduł Younga materiału beleczek kostnych oraz wyznaczono makroskopowe parametry materiałowe kości beleczkowej w zależności od obliczonych oraz przyjętych na podstawie literatury parametrów mikroskopowych.

4.1. Identyfikacja parametrów materiałowych beleczek kostnych

W następnym etapie podjęto próbę zidentyfikowania parametrów materiałowych beleczek kostnych na podstawie wyników symulacji próby ściskania oraz próby ściskania przeprowadzonej na maszynie wytrzymałościowej. W procesie symulacji próby ściskania sterowano modułem Younga materiału beleczek w celu uzyskania odkształcenia równego odkształceniu zarejestrowanemu podczas badania doświadczalnego (tab.1). Do obliczeń przyjęto stałą wartość współczynnika Poissona równą 0,3 ze względu na jego niewielki wpływ na zmianę własności mechanicznych w porównaniu z modułem Younga[1].

Obliczona wartość modułu Younga materiału beleczek kostnych wynosi 600 MPai jest o19% niższa niż wartości odnotowanew literaturze [1]. Na niską wartość modułu Younga beleczek kostnych wpływ może mieć między innymi sposób przechowywania preparatu i stan zdrowia dawcy. Preparaty przechowywane były w alkoholu etylowym, natomiast z dostępnych informacji wynikało, że dawca w przeszłości cierpiał na choroby zwyrodnieniowe stawu biodrowego.

4.2. Makroskopowy moduł Younga kości beleczkowej dla zidentyfikowanych parametrów

Zidentyfikowane parametry materiału beleczek kostnych wprowadzono do modelu numerycznego i przeprowadzono symulację próby ściskania (rys.4). Wykorzystując zależności na zmianę długości podczas ściskania osiowego, obliczono uśredniony moduł Younga kości beleczkowej, uwzględniając pory występujące w strukturze.

Obliczony moduł E dla kierunku zgodnego z przeprowadzoną doświadczalnie próbą ściskania wynosi 61,33 MPa. Rozbieżność między uzyskaną wartością a wynikiem pozyskanym na

bazie badań doświadczalnych (Tab.1) wynikać może ze sposobu pobrania próbki, a także problemów napotykanych podczas badań doświadczalnych.

4.3. Obliczenie parametrów materiałowych w kierunkach prostopadłych do osi ściskania

Kość beleczkowa charakteryzuje się ortotropowymi własnościami sprężystymi. W celu wyznaczenia wartości modułu Younga w innych kierunkach niż rozpatrywany w trakcie próby symulowano próbę ściskania w kierunkach prostopadłych, nieobjętych doświadczeniem (rys.5).



Rys.5. Symulacja próby ściskania (kierunek y)

Zaobserwowano kierunkowe własności rozpatrywanej struktury – wartości modułów E dla kierunków \mathbf{x} , \mathbf{y} są do siebie zbliżone, natomiast wartość modułu dla kierunku \mathbf{z} odbiega od pozostałych (tab.2). Wraz ze zwiększaniem wymiarów próbki różnica wartości parametrów materiałowych dla kierunków \mathbf{x} i \mathbf{y} jest coraz mniejsza. Dla próbki o wymiarze krawędzi większym od 5 mm materiał kości beleczkowej wykazuje własności bliskie ortotropii[4].

Makroskopowy moduł Younga [MPa]				
Ex	Ey	Ez		
131,61	140,10	61,33		

Tabela 2. Obliczone kierunkowe parametry materiałowe

4.4. Zależność między makroskopowym modułem Younga a mikroskopowymi parametrami materiałowymi

Ze względu na trudności napotykane w trakcie prowadzenia badań doświadczalnych odnotowane w literaturze wartości modułu Younga materiału beleczek kostnych zawierają się w szerokim zakresie od ok. 1 GPado 19 GPa [2]. Do modelu wprowadzono wybrane wartości modułu E beleczek [2,3] i zbadano ich wpływ na uśrednione wartości makroskopowego modułu Younga. Uzyskane wielkości porównano z wynikami obliczeń uwzględniającymi wcześniej zidentyfikowane parametry mikroskopowe (tab.3).

Tak jak poprzednio, w obliczeniach przyjęto współczynnik Poissonav_{trab} = 0,3 [1].

Moduł Younga beleczek kostnych	Makroskopowy moduł Younga [MPa]			
[MPa]	$\mathbf{E}_{\mathbf{x}}$	$\mathbf{E}_{\mathbf{y}}$	$\mathbf{E}_{\mathbf{z}}$	
600	131,61	140,10	61,33	
1500	276,84	289,38	145,12	
5000	595,04	671,23	400,40	
10000	801,01	937,43	646,72	

Tabela3. Zależność między parametrami mikroskopowymi a makroskopowymi

5. WNIOSKI I POSUMOWANIE

Parametry materiałowe beleczek kostnych mają znaczący wpływ na parametry makroskopowe kości gąbczastej. Własności kierunkowe wynikają z niejednorodnej budowy mikrostrukturalnej tkanki kostnej. Symulacje numeryczne, wykorzystujące modele utworzone na bazie danych z mikrotomografii komputerowej, pozwalają na wykonanie złożonych eksperymentów, których przeprowadzenie w warunkach laboratoryjnychjest trudne w realizacji.

LITERATURA

- 1. Cowin S.: Bone mechanics handbook. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- 2. Lorenzetti S.R.: New method to determine the Young's modulus of single trabeculae. DSc Dissertation, Zurich, 2006.
- 3. Currey J.: Bones. Structure and mechanics. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- Pahr D.H., Zysset P.K.: Influence of boundary conditions on computed apparent elastic properties of cancellous bone. "Biomechanics and Modeling in Mechanobiology", 2008, 7, p.463-476.

DETERMINATION OF THE MATERIAL PARAMETERS OF TRABECULAR BONE BASED ON SIMULATION AT MICROSCOPIC LEVEL

<u>Summary</u>. In this paper an attempt to determine material parameters of a trabecular bone for the macroscopic scale based on simulations in micro scale is prestented. The cylindrical sample of spongy bone extracted from a femoral head was scanned with theuse of computed micro-tomography and subjected to the compression test with the useof material testing machine. Then, numerical simulation of compression test was performed. On the basis of the obtained results, the identification of the material parameters of bone trabeculaes was made and the macroscopic material parameters of trabecular bone were calculated.