MODELOWANIE INŻYNIERSKIE ISSN 1896-771X
34, s. 37-42, Gliwice 2007

ANALIZA STANU OBCIĄŻENIA LEJKOWATEJ KLATKI PIERSIOWEJ PO KOREKCJI PŁYTKĄ STABILIZUJĄCĄ

BOŻENA GZIK-ZROSKA, DAGMARA TEJSZERSKA, WOJCIECH WOLAŃSKI

Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska
e-mail: bozena.gzikzroska@polsl.pl, dagmara.tejszerska@polsl.pl, wojciech.wolanski@polsl.pl

Streszczenie. W pracy podjęto próbę wyznaczenia stanu obciążenia lejkowatej klatki piersiowej po korekcji deformacji płytką stabilizacyjną. Z biomechanicznego punktu widzenia znajomość wartości obciążenia działającego na stabilizator jest konieczna do doboru optymalnych parametrów płytki. Na podstawie sformułowanego w programie Ansys modelu szkieletu lejkowatej klatki piersiowej człowieka wyznaczono wartości sił oddziaływających na płytkę wykorzystywaną do korekcji wad klatki piersiowej.

1. WSTĘP

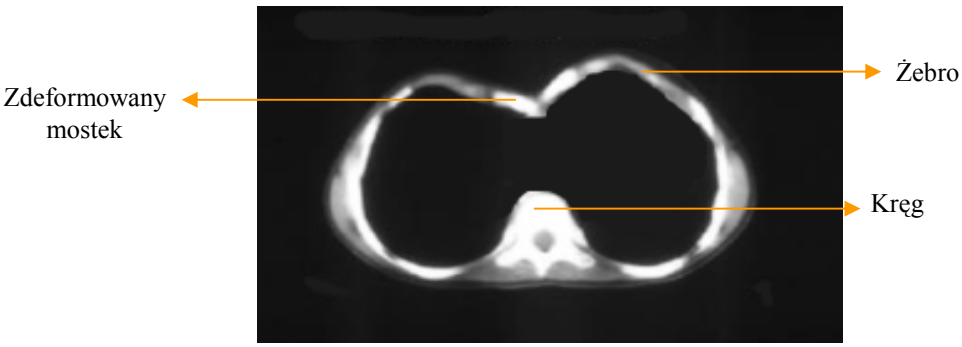
Deformacje kośćca klatki piersiowej powodują zaburzenia w funkcjonowaniu głównych narządów układu oddechowego i krążeniowego. Jednym z przykładów deformacji jest lejkowata klatka piersiowa. Wada ta powoduje zniekształcenie przedniej ściany klatki piersiowej, która polega na przemieszczeniu trzonu mostka wraz z przylegającymi żebrami w głąb klatki piersiowej. Metoda korekcji tego rodzaju deformacji zaproponowana w 1987 roku przez dr. Donalda Nussa jest metodą małoinwazyjną i nie wymagającą resekcji chrząstek żebrowych oraz rozległych cięć przedniej ściany klatki piersiowej. W tym celu wykorzystuje się płytkę stabilizacyjną, której zadaniem jest wypchnięcie zniekształconego mostka, a następnie utrzymanie go w prawidłowej pozycji przez okres od 12 do 24 miesięcy [1, 4].

W wielu publikacjach, których autorami są lekarze, istnieją wskazania na pojawiające się problemy w okresie przebywania implantu w organizmie człowieka. Komplikacje są w głównej mierze związane z przemieszczeniami, trwałymi odkształceniami czy też możliwością pęknięcia niektórych typów implantów w wyniku zmęczenia. Uszkodzony implant nie tylko może doprowadzić do nawrotu zniekształcenia klatki piersiowej, ale stanowi także realne niebezpieczeństwo dla życia pacjenta. W celu uniknięcia tych problemów konieczne jest opracowanie odpowiedniej metody doboru implantu, ze względu na panujący stan obciążenia przy korekcji deformacji.

2. ZAŁOŻENIA PRZYJĘTE W PROCESIE MODELOWANIA

Do określenia stanu naprężeń klatki piersiowej po korekcji lejkowatości metodą Nussa konieczne jest sformułowanie modelu lejkowatej klatki piersiowej. W pracy podjęto próbę

sformułowania tego rodzaju modelu dla konkretnego przypadku klinicznego. W celu odzwierciedlenia kształtu deformacji na zdjęciach tomografii komputerowej klatki piersiowej pacjenta dokonano pomiaru najbardziej charakterystycznych punktów, a więc najbardziej wystających punktów deformacji oraz miejsce największego zapadnięcia mostka. Dla badanego przypadku klinicznego wielkość deformacji wynosiła 5 cm (rys 1).



Rys. 1 Obraz tomografii komputerowej (TK) lejkowatej klatki piersiowej

W procesie modelowania przyjęto następujące założenia:

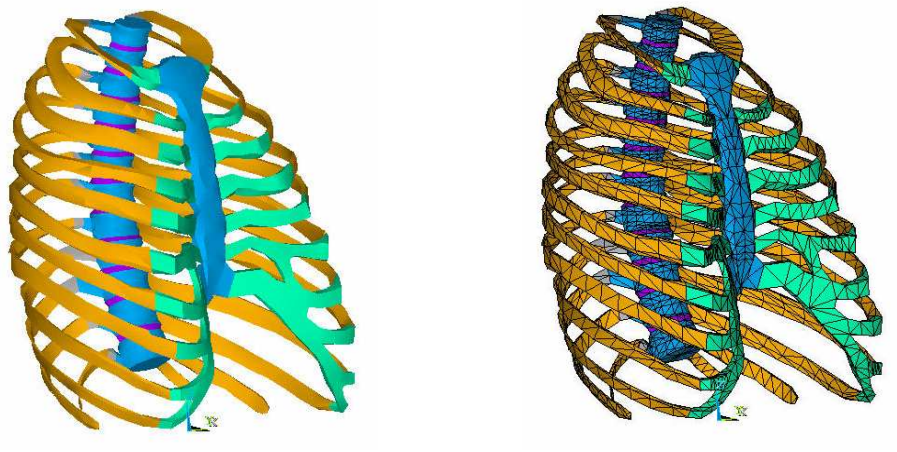
- kręgi, żebra, żebra chrzęstne, mostek traktowane są jako ciała jednorodne o własnościach izotropowych odzwierciedlających rzeczywistą geometrię oraz o różnych wartościach własności materiałowych,
- w modelu uwzględniono dyski, stawy międzykręgowe oraz stawy łączące żebra z kręgami o charakterystyce materiału liniowo–sprężystej odpowiadającej wartościom uśrednionym tkanek biologicznych,
- pominięto ciśnienie panujące wewnątrz klatki piersiowej oraz wpływ organów wewnętrznych,

Dla zamodelowanej klatki piersiowej (rys. 2) przyjęto izotropowe i liniowe własności mechaniczne struktur na podstawie danych literaturowych [2, 3], które zebrano w tabeli 1.

Tabela.1 Własności mechaniczne struktur klatki piersiowej [2, 3]

Element	Moduł Younga [MPa]	Liczba Poissona
Żebra	5000	0,3
Żebra chrzęstne	200	0,4
Mostek	11500	0,3
Kręgi	11500	0.3
Krążki międzykręgowe	110	0.4
Elementy chrzęstne	150	0.4

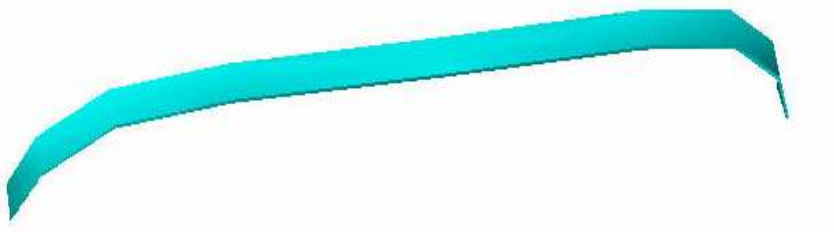
Przy tak dobranych parametrach geometrycznych i własnościach materiałowych został sformułowany model lejkowatej klatki piersiowej przy zastosowaniu MES w środowisku Ansys, który pokazano na rys. 2.



a) b)

Rys.2 Model lejkowatej klatki piersiowej: a) przed dyskretyzacją, b) po dyskretyzacji

W celu analizy stanu obciążeń i naprężeń panujących w klatce piersiowej po przeprowadzonym zabiegu operacyjnym do modelu lejkowatej klatki piersiowej domodelowano płytę stabilizującą odpowiadającą geometrii płyty wykorzystywanej w metodzie Nussa (rys. 3).



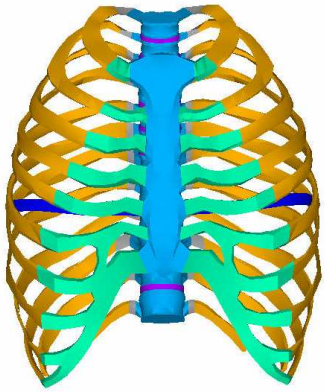
Rys. 3 Model geometryczny płyty stabilizującej

Model geometryczny płyty został podzielony na elementy skończone z takimi samymi parametrami i tym samym typem (SOLID95), co pozostałe elementy modelu. Następnie płycie nadano własności mechaniczne odpowiadające stopowi tytanu, które przedstawiono w tabeli 2.

Tabela.2 Własności mechaniczne płyty stabilizującej

Rodzaj stopu	Własności mechaniczne	
Ti_6-Al_{14}-V PN-EN 10088-1:1998	Umowna granica plastyczności	$Rp_{0.2}$ = 800 MPa
	Wytrzymałość na rozciąganie	Rm=400–900 MPa
	Moduł Younga	E = 210 GPa
	Współczynnik Poissona	ν=0.3

Oddziaływanie pomiędzy płytą a klatką piersiową (rys. 4) zamodelowano poprzez wspólne węzły. Siatka elementów skończonych tworząca model z płytą stabilizującą składała się z 11516 elementów. W sumie otrzymano 23900 węzłów, co w rezultacie dało 71700 stopni swobody.

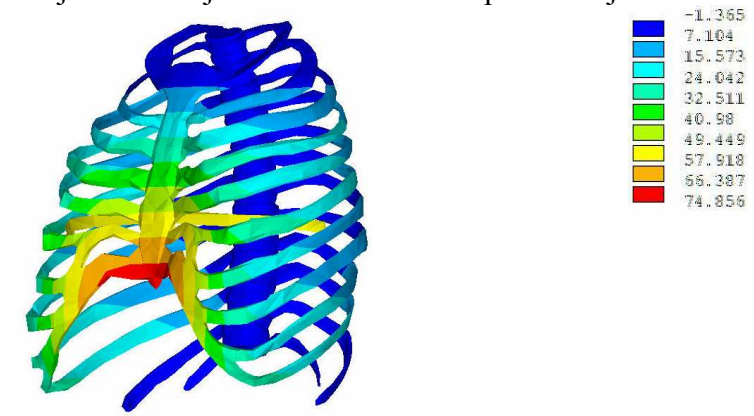


Rys. 4 Model lejkowatej klatki piersiowej z płytą stabilizującą

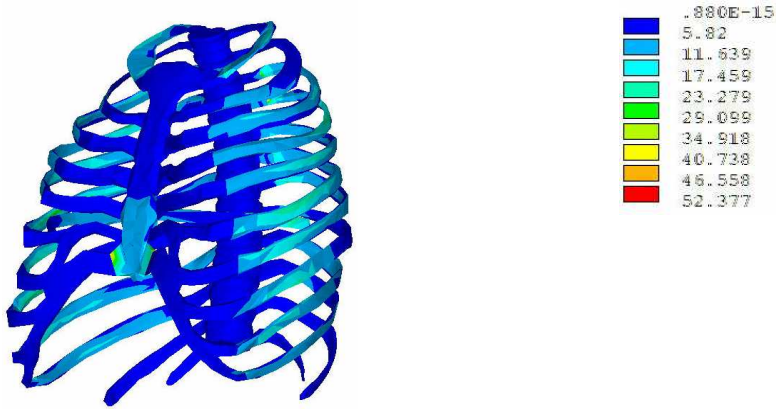
3. OBLICZENIA

W celu dokonania analizy stanu naprężeń i obciążeń panujących w klatce piersiowej po korekcji lejkowatości deformację skorygowano za pomocą płyty stabilizującej. W węzłach płyty zadano przemieszczenie równe 5 cm i wypchnięto zdeformowane fragmenty klatki piersiowej. Natomiast tylna ściana klatki piersiowej została podparta poprzez odebranie stopni swobody we wszystkich węzłach kręgów.

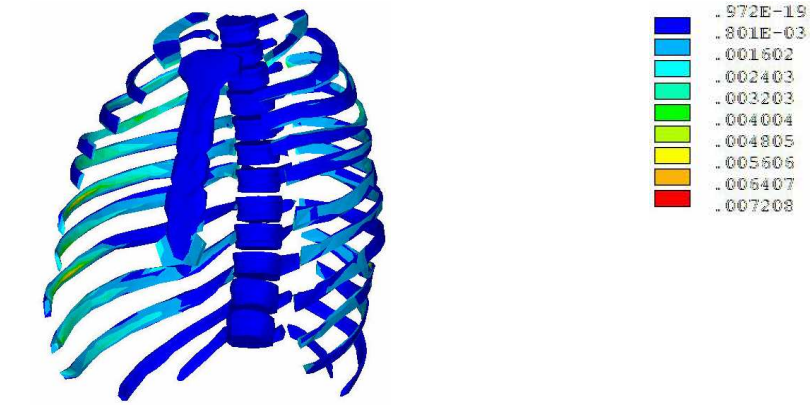
Poniżej przedstawiono przykładowe otrzymane wyniki symulacji: przemieszczenia (rys. 5), odkształcenia (rys. 7, 8) oraz naprężenia (rys. 6), na podstawie których przeprowadzono analizę wpływu korekcji deformacji na własności klatki piersiowej.



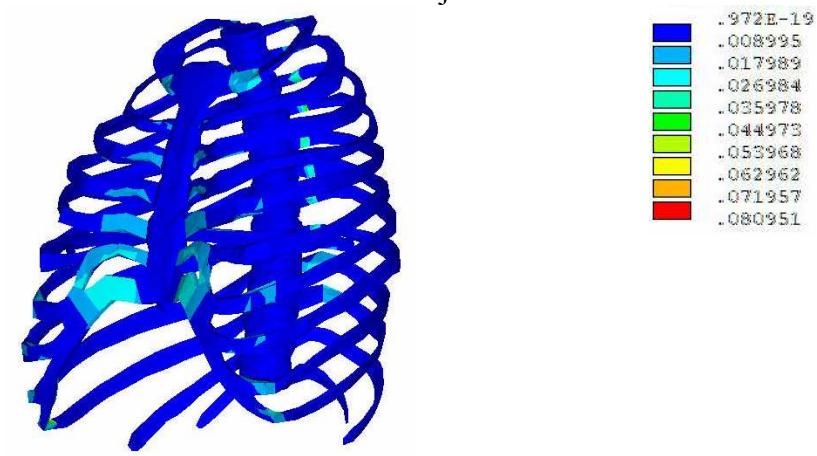
Rys.5 Mapy przemieszczeń w klatce piersiowej uzyskane podczas korekcji deformacji



Rys.6 Mapy naprężeń uzyskane w klatce piersiowej podczas korekcji



Rys.7 Mapy odkształceń głównych ε_1 uzyskane w kośćcu klatki piersiowej podczas korekcji deformacji



Rys.8 Mapy odkształceń głównych ε_1 uzyskane w klatce piersiowej podczas korekcji deformacji

4. ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI

Uzyskane wyniki obliczeń numerycznych umożliwiły analizę naprężeń i odkształceń powstałych w klatce piersiowej po przeprowadzonym zabiegu korekcji lejkowatej klatki piersiowej metodą Nussa. Model umożliwia również wyznaczenie wartości siły potrzebnej do korekcji tego rodzaju deformacji. Uzyskane informacje stanowiły podstawę do określenia wpływu korekcji na rozkład naprężeń i odkształceń oraz określenie miejsc, w których mogą powstać nieoczekiwane urazy.

Przez lata powstało wiele teorii opisujących wytrzymałość kości, ale wraz z rozwojem technik komputerowych powstały teorie opierające się na metodach numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Jedną z takich teorii jest teoria prof. Nackenhorsta [5], na podstawie której dokonano analizy otrzymanych wyników numerycznych. Metoda ta jest stosowana w połączeniu z metodą elementów skończonych, a opiera się na rozkładzie maksymalnych odkształceń głównych. Według niej dla wartości odkształcenia ε_1 mniejszej od $4*10^{-3}$. (wartości fizjologiczne) mają miejsce naturalne warunki obciążenia, dla których występuje stan równowag kości. Natomiast, gdy ε_1 przekracza wartości fizjologiczne (ε_1 w przedziale od 0,004 do 0,006), następuje formacja kości ze względu na dodatkowe obciążenia stymulujące kość do poprawy własności mechanicznych. Natomiast dla wartości odkształceń z zakresu od 0,006 do 0,014 występuje stan przeciążenia

kości, który może doprowadzić do jej uszkodzenia, a powyżej tej wartość kość ulega zniszczeniu [5].

Opierając się na powyższych założeniach, zbadano rozkład odkształceń głównych struktur klatki piersiowej uzyskanych podczas obliczeń, a przedstawionych na rys. 7 i 8. Z przedstawionych map odkształceń można wywnioskować, że uzyskana korekcja lejkowatej klatki piersiowej poprzez wypchnięcie zniekształcenia za pomocą płyty stabilizującej powoduje znaczne odkształcenia nie tylko elementów żeber chrzęstnych, ale także żeber kostnych. Jednak uzyskane maksymalne wartości w żebrach kostnych, wynoszące 0,0072, nie wskazują na występowanie stanu przeciążenia kości, co wynika prawdopodobnie z dużej podatności i elastyczności żeber. Natomiast w obszarze mostka oraz kręgosłupa występują niewielkie odkształcenia. Ich wartości nie przekraczają zakresu fizjologicznego, więc nie występuje tam stan przeciążenia.

Przeprowadzona analiza map naprężeń i odkształceń ujawniła, iż zabieg korekcji deformacji powoduje w miarę równomierny ich rozkład. Obciążenia są przenoszone równomiernie w większości przez żebra kostne oraz dolną część mostka. Podczas przeprowadzonych obliczeń numerycznych również wyznaczono wartość siły, jaka jest potrzebna do korekcji deformacji wielkości 5 cm. Uzyskana wartość siły w tym przypadku wynosiła 296 N. W dalszych badaniach może ona posłużyć do optymalizacji parametrów geometrycznych płytki stabilizującej, a tym samym do określenia optymalnych warunków leczenia

LITERATURA

1 Correira de Matos, Bernardo E.J., Fernandese E.J.: Surgery of chest wall deformities. “European Journal of Cardio-thoracic Surgery” 1997, 12.
2 Forbes P.A.: Development of a Human Body Model for the Analysis of Side Impact Automotive Thoracic Trauma. Waterloo, Ontario, Canada, 2005.
3 Furusu K., Watanabe I., Kato Ch., Miki K., Hasegawa J.: Fundamental study of side impast analysis using the finite element model of the human thorax. “JSAE” 2001, 22, 195-199.
4 Jacobs P.J., Quintessenze J.A., Morell V.O., Botero L.M., van Gelder H.M., Tchervenkov C. I.: Minimally invasive endoscopic repair of pectus excavatum. “European Journal of Cardio-thoracic Surgery” 2002, 21.
5 Nackenhorst, U.: Numerical simulation of stress stimulated bone remodeling. “Technische Mechanik” 1997, 17 (1), 31- 40.

STRESS ANALYSIS IN FUNNEL CHEST AFTER STABILIZATION WITH A PLATE

Summary. In this work the funnel chest stress after stabilizing plate correction was determined. The knowledge of stress values affecting stabilizator is a mandatory condition during optimal plate parameter selection from biomechanical point of view. On the basis on formulated in ANSYS model of funnel chest skeleton, stress values affecting plate used for chest defect correction were determined.